

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**Mapeamento do potencial solar em ambiente urbano**

**Sérgio Gonçalo da Silva Guimarães**

Dissertação  
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente

**2014**

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**Mapeamento do potencial solar em ambiente urbano**

**Sérgio Gonçalo da Silva Guimarães**

Dissertação  
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente

Orientadores:

Miguel Centeno Brito e Cristina Sousa Catita

**2014**

## Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para o mapeamento do potencial solar em ambiente urbano baseada em sistemas de informação geográfica (SIG), com o objetivo específico de avaliar a relevância das fachadas e outras superfícies com inclinação mais próxima da vertical no potencial solar total da paisagem urbana. Partindo de noções empíricas do ponto de vista de maior aproveitamento da radiação solar nestas superfícies, definiu-se uma relação matemática entre a percentagem de área e altura média, para o conjunto dos edifícios de uma subseção censitária, a que se chamou *indicador de densidade do edifício (IDE)*, e com base nos resultados da sua aplicação foram escolhidas duas amostras com características antagónicas do ponto de vista da penetração da radiação, dentro do município da cidade de Lisboa, Portugal. Foram selecionados os edifícios residenciais de ambas as zonas, e estimada a população residente. Com base nestes resultados, e em dados de consumo de energia elétrica *per capita* para um ano típico, foi estimado o consumo de energia elétrica por edifício e por zona. O potencial solar de telhados e fachadas destes edifícios foi calculado partindo de um modelo digital de superfície que deriva de um levantamento LiDAR (Light Detection and Ranging), e de uma série temporal local do ano meteorológico típico, e os resultados são comparados com o consumo de energia elétrica estimado anteriormente. O potencial fotovoltaico é estimado considerando fatores de produção e eficiência típicos destes sistemas. Da comparação do potencial fotovoltaico com o consumo de eletricidade verifica-se que as fachadas apresentam um potencial significativo dada a sua ampla área, apesar de receberem menor densidade de radiação solar. A sua contribuição é também importante para ajustar a produção fotovoltaica ao diagrama de carga em particular nos meses de Verão, e isto aponta para uma interessante complementaridade de produção entre fachadas e telhados.

**Palavras-chave:** Potencial solar, fachadas, sistemas de informação geográfica, LiDAR, modelo digital de superfície.

## Abstract

This work presents a methodology for solar potential mapping on the urban environment, based on geographic information systems (GIS), with the specific purpose of evaluate the relevance of facades and other surfaces with near vertical slopes, on the overall solar potential of the urban landscape. From empirical notions given the perspective of a higher solar yield over this surfaces, a mathematical relation was defined between the area percentage and the average height, for the set of buildings of each census block from the area of study, that was named *building density indicator (BDI)*, and based on its results, two areas were chosen, with opposite characteristics from the perspective of solar radiation penetration, from the municipal city of Lisbon, Portugal. The residential buildings of both areas were identified and for each one the resident population was estimated. Based on this results and on electric energy consumption per capita data for a typical year, the electrical energy consumption was estimated for each building and for both areas as a whole. The solar potential of the buildings roofs and facades was computed from a digital surface model (DSM) originated from a LiDAR survey and from a local typical meteorological year time series and the results are compared with the electricity consumption previously estimated. The photovoltaic potential is estimated from these results, considering the typical performance ratio and efficiency of these systems. From the comparison of the photovoltaic potential with the electricity consumption it's possible to notice that facades show a significant potential given its large surface area despite the fact that they receive lower solar radiation density. Their contribution it's also important to adjust the photovoltaic production to the load diagram, particularly during the summer months, thus pointing an interesting complementarity between facades and roofs.

**Keywords:** Solar potential, facades, geographic information systems, LiDAR, digital surface model.

# Índice

Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas.....	xi
Acrónimos.....	xii
Agradecimentos.....	xiii
1– Introdução.....	1
1.1 – Objetivos do estudo .....	1
1.2– Motivação .....	2
1.3 – Resumo da Metodologia.....	3
1.4 – Contribuição científica do trabalho .....	4
1.5 – Estrutura do trabalho .....	5
2– Contexto e revisão bibliográfica .....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 – Metodologia de outros estudos de potencial.....	8
3 – Metodologia do estudo .....	24
3.1 Escolha das zonas de Interesse.....	24
3.1.1 – Indicador de densidade do edificado .....	27
3.1.2 - Implementação do indicador.....	28
3.1.3 - Resultados.....	29
3.1.4 – Seleção das amostras .....	32
3.1.5 – Caracterização correta da amostra .....	34
3.2 – Estimativa da população por edifício .....	40
3.2.1 – Resultados .....	47
3.2.2 Estimativa do consumo de energia elétrica.....	52
3.3 – Estimativa do potencial solar .....	54
3.3.1 Descrição do funcionamento do programa SOL .....	54
3.3.2 Processamento dos dados.....	56

4 – Resultados e Discussão .....	60
5 - Conclusões .....	71
6. Referências .....	75

## Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de um sistema ALS (Carneiro 2011).....	6
Figura 2 - Mapa do potencial fotovoltaico: Produção anual média por potência nominal instalada e por unidade de área, assumindo uma eficiência típica de 12% (Brito et al. 2012).....	9
Figura 3 - Histograma cumulativo dos edifícios (linha sólida) e respetiva população estimada (linha a tracejado), em função da pegada de construção do edifício (Brito et al. 2012). ....	10
Figura 4 - Classificação tipológica do edificado e respetiva população distribuída (Santos et al. 2014). ....	11
Figura 5 - Eletricidade produzida por painéis fotovoltaicos nos telhados dos edifícios residenciais, classificados por classes (Santos et al. 2014). ....	11
Figura 6 - Gráfico de dispersão, representado por grupos, da fração solar com um ajuste exponencial (Santos et al. 2014). ....	12
Figura 7 - Resultados horários das simulações em comparação com as medições para semanas típicas de Inverno e Verão (Jakubiec & Reinhart 2013). ....	13
Figura 8 – Comparação das previsões mensais de vários métodos (Jakubiec & Reinhart 2013). ....	14
Figura 9 - Imagens do processo de criação do modelo tridimensional da área de estudo, a partir da informação LiDAR e SIG (Jakubiec & Reinhart 2013). ....	15
Figura 10 - Tesselação do volume utilizando o modelo de voxels, e segmentação das superfícies dos polígonos (Hofierka & Zlocha 2012). ....	16
Figura 11 - Vetores normais (a vermelho) dos polígonos com um voxel de 2m e um conjunto de vetores de raios solares calculados com um passo de tempo de 1 hora (Hofierka & Zlocha 2012). ....	17
Figura 12 - Radiação solar mensal para janeiro, em condições de céu limpo (Hofierka & Zlocha 2012). ....	18
Figura 13 - Radiação global mensal para Julho, em condições de céu limpo (Hofierka & Zlocha 2012). ....	18
Figura 14 - Esquema do cálculo da geometria solar, utilizado para obter a altura, o azimute, o número de horas de sol e o ângulo de incidência (Erdélyi et al. 2014). ....	19
Figura 15 - (a) Imagens GoogleMaps dos edifícios da Universidade de Sheffield, Reino Unido; o triângulo verde representa a célula fotovoltaica (ou seja, a posição do piranómetro); (b), (c) Um esquema gráfico da forma como o SORAM considera os obstáculos na determinação da quantidade de radiação difusa que atinge a célula (Erdélyi et al. 2014). ....	20
Figura 16 - Exemplo da informação LiDAR classificada por tipo de uso, para um bairro da cidade de Genebra (Carneiro et al.2010). ....	21

Figura 17 – Abordagem híbrida de geovisualização para mapa de radiação solar em áreas urbanas: (1) – Visualização 3D de um indicador quantitativo da radiação média nas fachadas dos edifícios ( $W/m^2$ ) no dia 10 de Dezembro ao meio dia para um bairro da cidade de Genebra; (2) – perfil gráfico com informação estatística acerca da percentagem de superfícies verticais, sujeitas a radiação direta com o aumento da altura [%] para o mesmo dia, às 10 horas, ao meio dia, e às 14 horas (Carneiro et al.2010).....	22
Figura 18-Mapa das secções censitárias 2011. (Instituto Nacional de Estatística 2011). ....	25
Figura 19- Cartografia do edificado disponível numa primeira fase do trabalho, inseridos nas respetivas divisões censitárias. ....	26
Figura 20 - Pontos centróides dos polígonos que representam os edifícios, inseridos no mapa de divisões censitárias. ....	27
Figura 21 - Janela de implementação da função point density. ....	28
Figura 22 - Resultados da função point density para a Altura Média dos edifícios de uma subsecção.....	29
Figura 23 - Resultados da função point density para a percentagem de área dos edifícios de uma subsecção.....	30
Figura 24 - Resultados da função point density para o IDE.....	30
Figura 25 - Comparação da cartografia de base da plataforma Lisboa Interativa à escala de 1:5000 (à esquerda) com a cartografia de base à escala 1:25000 utilizada para a criação do indicador (à direita). ....	31
Figura 26 - Seleção da zona da amostra com características “menos boas” (Zona A). ....	32
Figura 27- Seleção da zona da amostra com boas características (Zona B). ....	33
Figura 28 - Imagens street view via GoogleMaps™ do espaço entre edifícios, para a zona menos boa à esquerda e para a zona boa à direita.....	34
Figura 29 - Imagens satélite via GoogleMaps™, para a zona menos boa à esquerda e para a zona boa à direita. ....	34
Figura 30 - Caracterização das amostras com o indicador construído com uma cartografia menos generalizada. Zona B.....	35
Figura 31 - Caracterização das amostras com o indicador construído com uma cartografia menos generalizada. Zona B.....	35
Figura 32 - Resultados da função point density para o indicador, quando o raio de vizinhança da função é 100 metros. Zona A.....	37
Figura 33 - Resultados da função point density para o indicador, quando o raio de vizinhança da função é 100 metros. Zona B.....	38
Figura 34 - Esquema Workflow do processo de classificação da tipologia do edificado. ....	40
Figura 35 - Representação cartográfica das pegadas do edificado (a lilás) e dos eixos de via (a preto) da região A, à escala 1:15000.....	43



Figura 36 - Representação cartográfica das pegadas do edificado (a azul ciano) e dos eixos de via (a preto) da região A, à escala 1:15000.....	44
Figura 37 - Tabela de informação censitária auxiliar.....	44
Figura 38 - Classificação tipológica do edificado disponível na plataforma Lisboa Interativa....	46
Figura 39 - Edificado residencial (azul) e não residencial (vermelho) para a zona A. ....	47
Figura 40 - Edificado residencial (azul) e não residencial (vermelho) para a zona B.....	48
Figura 41 - Subsecções da zona B que contém apenas moradias .....	49
Figura 42 - Subsecções da zona B que contém apenas edifícios de apartamentos. ....	50
Figura 43 - Mapa da distribuição da população por edifício para a zona A. ....	51
Figura 44 - Mapa da distribuição da população por edifício para a zona A. ....	51
Figura 45 - Diagrama de carga representativo do consumo mensal ao longo do ano, para a zona A. A azul-escuro o consumo total, a azul claro o consumo sem <i>baseload</i> .....	53
Figura 46 - Diagrama de carga representativo do consumo mensal ao longo do ano, para a zona B. A azul-escuro o consumo total, a azul claro o consumo sem <i>baseload</i> .....	53
Figura 47 - Consumo anual total por edifício. Zona A à direita e zona B à esquerda.....	54
Figura 48 - Grelhas LiDAR. (Zona A à direita, Zona B à esquerda). ....	55
Figura 49 - Esquema <i>workflow</i> do processamento dos resultados do programa SOL, em ArcMap™. Para as fachadas (à esquerda) e para os telhados (à direita).....	56
Figura 50 - Representação dos <i>layers</i> de pontos das fachadas, num intervalo de tempo específico, para as duas zonas (Zona A à direita, Zona B à esquerda). ....	57
Figura 51- Representação dos <i>rasters</i> de telhados e chão, num intervalo de tempo específico, para as duas zonas (Zona A à esquerda, Zona B à direita). ....	57
Figura 52 - Representação da conversão dos polígonos em linhas (fachadas) para as duas zonas (Zona A à direita, Zona B à esquerda). ....	58
Figura 53 - Representação dos pontos de fachadas, resultantes da operação spatial join, para as duas zonas (Zona A à esquerda, Zona B à direita).....	59
Figura 54 - Representação dos pontos dos telhados, resultantes da operação Intersect, para as duas zonas (Zona A à esquerda, Zona B à direita).....	60
Figura 55 - Histograma do potencial fotovoltaico para a a zona A (a vermelho) e para a zona B (a preto). As linhas a tracejado representam as fachadas e as linhas sólidas representam os telhados. ....	62
Figura 56 - Radiação global anual para as duas zonas. Zona A em baixo, zona B em cima. ....	63
Figura 57- Radiação solar mensal (telhados: coluna vermelha; fachadas: laranja/amarelo de acordo com 4 classes diferentes: acima de 900 kWh/m2/ano, entre 700 e 900 kWh/m2/ano, entre 500 e 700 kWh/m2/ano e abaixo de 500 kWh/m2/ano, respetivamente, e consumo de energia elétrica; linha a tracejado: consumo total mensal, e linha sólida: consumo mensal sem <i>baseload</i> ) para a zona B à esquerda e zona A à direita. ....	64

Figura 58 - Radiação solar para a zona B em cima e zona A em baixo, para as 12 horas do dia 21 de Dezembro.....	67
Figura 59 - Radiação solar para a zona B em cima e zona A em baixo, para as 9 horas do dia 21 de Junho. ....	68
Figura 60 - Consumo horário de energia elétrica (linha azul) e potencial fotovoltaico de telhados (amarelo), fachadas (vermelho) e telhados e fachadas (vermelho escuro) para zona B (esquerda) e zona A (direita) para um dia de Inverno (em cima) e para um dia de Verão (em baixo). ....	70

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1- Parâmetros da distribuição de valores do IDE para um raio de 300 m e 100 m para as duas zonas. ....	39
Tabela 2 - Resultados comparativos da classificação do edificado. ....	49

## **Acrónimos**

ALS (Airborne Laser Scanning), 4

AVAC (Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), 9

BAPV (Building Applied Photovoltaics), 2

BGRI11 (Base Geográfica de Referenciação de Informação, para o ano de 2011), 10

BAPV (Building Applied Photovoltaics), 2

BIPV (Building Integrated Photovoltaics), 2

DGPS (Sistema Global de Posicionamento Diferencial), 5

DSM (Modelo Digital de Superfície), 5

DTM (modelo digital do terreno), 5, 11

ETRS 89 (European Terrestrial Reference System 89), 2

FAR (Floor Area Ratio), 3

GPS (Sistema Global de Posicionamento), 5

IDE (Indicador de Densidade do Edificado), 3

IGeoE (Instituto Geográfico do Exército), 11

INE (Instituto Nacional de Estatística), 10

LiDAR (Light Detection and Ranging), 4

SIG (Sistemas de Informação Geográfica), 1

INS (Sistema de Navegação Inercial), 5

SFV (*Sky View Factor*), 8

## **Agradecimentos**

Começo com um agradecimento especial aos meus orientadores, o Professor Miguel Brito e a Professora Cristina Catita, pela paciência e disponibilidade, e por toda a orientação científica, ajuda e motivação ao longo deste trabalho, à Professora Paula Redweik pela orientação que me deu na utilização e compreensão do programa SOL que é parte fundamental deste trabalho, e às minhas colegas de curso Rita Hogan e Sara Freitas pela enorme ajuda no longo processo de processamento de dados e pelos comentários ao trabalho escrito.

Quero também agradecer à LOGICA pela disponibilização dos dados LiDAR utilizados.

Por último, um agradecimento muito especial aos meus patrocinadores, aos meus amigos e um mais especial ainda para Alexou.

## **1– Introdução**

Nas últimas décadas, tem sido crescente a utilização de energia elétrica produzida por tecnologias de energia solar. O potencial solar do planeta é imenso e capaz de satisfazer várias vezes as necessidades energéticas globais sem recorrer a combustíveis fósseis ou outras tecnologias de produção de energia que implicam impactos insustentáveis no contexto atual das alterações climáticas. A avaliação do recurso solar é muitas vezes feita com recurso a cartas de potencial, uma vez que a representação da sua distribuição sobre uma determinada área é fundamental para compreender as possibilidades de aproveitamento e utilização. Nos meios urbanos, onde se concentram as populações e o consumo de energia se acentua, esta representação exige considerações mais cuidadas, dada a complexidade de interações da radiação solar com os objetos que compõe a paisagem urbana. Para estes objetivos, as capacidades dos sistemas de informação geográfica (SIG) aliadas a novas formas de recolha de informação espacial georreferenciada, tem tornado possível a criação de cartas do recurso solar cada vez mais rigorosas. É neste contexto que se insere o trabalho apresentado seguidamente.

### **1.1 – Objetivos do estudo**

Este estudo apresenta uma metodologia para o mapeamento do potencial solar em ambiente urbano. Tipicamente são as superfícies horizontais dos telhados que são utilizadas para a aplicação de sistemas de energia solar, mas nesta estimativa será também avaliado o potencial das fachadas. O objetivo essencial é perceber qual poderá ser a contribuição das fachadas em termos de produção fotovoltaica, que se espera que seja elevado, considerando à partida que nas cidades modernas as fachadas representam uma área muito superior à área dos telhados, e na grande maioria estão livres de algumas infraestruturas dos edifícios (chaminés, motores de elevadores, ventiladores) e normalmente apresentam melhores geometrias para a manutenção dos sistemas de energia solar, dado que superfícies verticais não acumulam tanta poeira e outros detritos, e raramente se encontraram cobertas de neve no Inverno.

O cálculo do potencial solar será feito com recurso ao programa SOL, um modelo recentemente publicado em Redweik et al. 2013, desenvolvido na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, do qual resulta a informação a ser utilizada na estimativa da produção fotovoltaica, para telhados e fachadas dos edifícios das áreas de estudo, integradas no município de Lisboa. Assim sendo, um dos objetivos deste estudo é criar um método para caracterizar *à priori* o ambiente urbano do ponto de vista do aproveitamento do recurso solar, considerando os edifícios por inteiro como coletores de energia solar, e serão escolhidas duas zonas: uma zona onde predominem edifícios altos em ruas mais largas (que neste estudo corresponde a uma morfologia urbana com boas características para este aproveitamento), e uma outra com edifícios mais baixos inseridos

em ruas mais estreitas (que neste estudo corresponde a uma morfologia urbana com características menos boas para este aproveitamento).

O objetivo principal deste estudo centra-se na avaliação da produção fotovoltaica em ambas as zonas. A avaliação será feita através da comparação com consumo doméstico de energia elétrica. Para a análise poder ser feita ao nível individual dos edifícios, é necessário estimar a população por edifício, dado que o consumo doméstico do edifício será estimado com base no número de residentes. Assim desenvolveu-se também um método que permite estimar o número de habitantes por edifício, baseado numa técnica de extrapolação designada por mapeamento dasimétrico.

## 1.2– Motivação

A energia solar fotovoltaica é considerada como uma fonte abundante, limpa e segura de energia elétrica, uma vez que apresenta vantagens começando pela natureza modular e silenciosa dos sistemas de produção, até à possibilidade de produzir energia descentralizadamente permitindo evitar as perdas na transmissão e no ponto de ligação à rede, dado que a energia pode ser produzida no ponto de consumo. Além disso, em ambiente urbano, nomeadamente nos edifícios, que representam a grande fatia do consumo, a produção fotovoltaica apresenta uma elevada correlação com o pico de consumo em cidades onde o consumo é pautado por gastos em climatização, permitindo a combinação de produção de energia com outras funções dos edifícios (e.g. isolamento térmico) (Brito et al. 2012).

Essa relevância já foi reconhecida em vários países em termos governamentais através da aplicação políticas subsidiárias de incentivo à produção em sistema *feed-in*, que resulta numa produção distribuída de eletricidade a ser integrada na rede e que pode ser considerada como uma espécie de armazenamento virtual de energia (Jelle & Breivik 2012). No contexto Europeu, a sustentabilidade energética dos edifícios é assumidamente um objetivo, e está expresso na diretiva europeia 2010/31/EU que estabelece que, de 2020 em diante, os novos edifícios têm de ser *Nearly Zero Energy Buildings*, e que tem certamente motivado desenvolvimentos nas vertentes tecnológicas *BAPV* (*Building Applied Photovoltaics*) e *BIPV* (*Building Integrated Photovoltaics*).

Existem atualmente no mercado soluções que permitem a integração de sistemas fotovoltaicos tanto como superfícies de cobertura térmica, bem como superfícies geradoras de energia elétrica, simultaneamente, contudo é necessário mais investigação e desenvolvimento a nível tecnológico para que se atinjam melhores níveis de eficiência das células, redução dos custos de produção e integração dos sistemas nos edifícios (Vats & Tiwari 2012). Estes campos de investigação são

certamente importantes para o desenvolvimento e crescente aplicação dos sistemas fotovoltaicos, no entanto, a criação de meios para obter informação mais rigorosa ao nível do potencial solar no ambiente urbano pode aumentar a aplicação de sistemas *state of the art* a par da sua evolução. A motivação desta investigação vem com base nesta ideia, ou seja, de que uma avaliação mais rigorosa deste potencial, através de uma modelação mais precisa pode revolucionar a forma como estes sistemas são tipicamente utilizados em ambiente urbano e fomentar a sua aplicação.

### 1.3 – Resumo da Metodologia

A metodologia seguida para a concretização dos objetivos deste estudo resume-se às seguintes fases de trabalho:

1. Seleção das áreas de estudo
2. Cálculo do potencial fotovoltaico nas áreas de estudo
3. Estimativa da população na área de estudo
4. Avaliação do consumo energético doméstico nas áreas de estudo
5. Comparação dos consumos energéticos com as estimativas de produção fotovoltaica.

Para a implementação desta metodologia procedeu-se primeiramente à aquisição de alguma informação e respetivo processamento tal como se descreve de seguida. Além do programa SOL (Redweik et al. 2013) que é utilizado como o modelo para o potencial solar, uma ferramenta essencial da metodologia é o *ArcGIS desktop 10* (ESRI 2012), com a qual a informação será manipulada e representada com rigor espacial. Toda a informação transportada para os ambientes *ArcMap 10* e *ArcScene 10* (ESRI 2012) serão projetados no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS 89 (*European Terrestrial Reference System 89*), que é o sistema de referência recomendado pela EUREF e adotado em Portugal Continental.

Foram adquiridos dados cartográficos devidamente classificados numa estrutura vetorial no formato *shapefile* dos limites administrativos, secções e subsecções censitárias do município de Lisboa, à escala 1:10000, do edificado do município de Lisboa à escala de 1:25000, do edificado das duas zonas de estudo à escala 1:15000. Foi também utilizada informação auxiliar tabular associada à cartografia dos limites administrativos (CAOP, 2013), bem como fotografias áreas da plataforma *GoogleMaps*<sup>TM</sup> e informação da plataforma *Lisboa Interativa*<sup>TM</sup> (disponível online em <http://lxi.cm-lisboa.pt/lxi/>) da Câmara Municipal de Lisboa, relacionada com a classificação tipológica do edificado.



No âmbito deste estudo foi criado um indicador de densidade do edificado (IDE) que irá relacionar área ocupada pelos edifícios e a sua altura média, com o objetivo de caracterizar a morfologia urbana do município.

É importante referir que esta metodologia começa com uma abordagem menos precisa para avaliar globalmente (ao nível do município) as zonas alvo das seguintes fases do trabalho. O IDE será recalculado a partir dos dados cartográficos de maior rigor para melhor caracterizar essas mesmas zonas quanto à morfologia urbana.

Na estimativa do consumo de energia elétrica por edifício, dado que a informação zonal do número de residentes não está disponível ao nível do edifício, será necessário adaptar, consoante os dados disponíveis, uma metodologia de desagregação que vai permitir a estimativa do número de residentes por edifício. Seguidamente o consumo de energia elétrica por indivíduo será estimado recorrendo a uma normalização do diagrama de carga para um ano típico, e por fim, o consumo de energia ao nível do edifício é considerado igual ao consumo do número de indivíduos residentes

Por sua vez, a produção fotovoltaica é calculada com os resultados de radiação global do programa SOL para vários intervalos temporais: em termos diários, para cada hora, foram somados todos os valores de radiação global para todos os pontos de fachadas e telhados. O mesmo foi feito, em termos anuais, mês a mês. Estes resultados foram multiplicados pela eficiência e pelo fator de produção típicos de sistemas fotovoltaicos que se assumiram na ordem dos 75 % e 15 % respetivamente.

#### **1.4 – Contribuição científica do trabalho**

Por utilizar resultados de modelação do potencial solar ao nível das fachadas dos edifícios, este estudo permite estimar a produção fotovoltaica destas superfícies, e os resultados desta estimativa contribuem para a perspetiva emergente de que os edifícios não estão limitados à área dos telhados para o aproveitamento do recurso solar. Além disso, a produção fotovoltaica é avaliada em comparação com uma estimativa do consumo de energia elétrica, e por isso é possível perceber até que ponto é que diferentes níveis de aproveitamento poderiam satisfazer essas mesmas necessidades.

Outra contribuição importante é a criação do IDE, que pode ser uma ferramenta útil na caracterização preliminar do ambiente urbano quanto à penetração da radiação solar, uma vez que relaciona o conceito de *Floor Area Ratio* (FAR), muitas vezes utilizado em estudos de zonamento e planeamento urbano, com a altura média dos edifícios, para cada subsecção.

## **1.5 – Estrutura do trabalho**

No capítulo 2, será apresentada uma revisão de estudos semelhantes e será feita uma análise comparativa com a metodologia seguida neste trabalho. Serão descritos de forma resumida outros modelos de potencial solar com base de SIG (Sistemas de Informação Geográfica). Dada a sua importância na aquisição de dados para este tipo de estudos, apresenta-se também uma pequena revisão do estado da arte da tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging).

No capítulo 3, será explicada a metodologia deste estudo. Em primeiro lugar será descrita a abordagem para a seleção das duas zonas de interesse no município de Lisboa, que passa pela criação do indicador de densidade do edificado (IDE) que pretende fornecer informação quanto à morfologia urbana de cada zona, nomeadamente em termos de afastamento entre os edifícios e das relações de vizinhança em termos da altura dos mesmos.

Segue-se a descrição da metodologia adaptada para a distribuição da população por edifício e por fim é explicado o processamento dos resultados do programa SOL.

No capítulo 4, far-se-á a discussão dos resultados da comparação da produção *versus* consumo para todos os edifícios de ambas as zonas. A discussão passa por uma comparação da produção fotovoltaica com o consumo doméstico para as duas zonas. Na tentativa de compreender o papel das fachadas e a sua contribuição para a satisfação do consumo, estas serão separadas em vários patamares de produção para permitir perceber quais as melhores fachadas do ponto de vista da rentabilidade do investimento no contexto atual do mercado.

Por fim, no capítulo 5, apresentar-se-ão as conclusões do estudo e as perspetivas de trabalho futuro.

## **2– Contexto e revisão bibliográfica**

### **2.1 Introdução**

A complexidade de interações da radiação solar com a geometria bastante variável das superfícies que compõe a paisagem urbana exige uma modelação rigorosa no sentido de maior precisão, e tem vindo a evidenciar as potencialidades da associação de modelos numéricos e sistemas de informação geográfica (SIG). Os sistemas SIG apresentam não só a capacidade de representação da informação georreferenciada, como também permitem analisar e manipular de forma eficiente os grandes volumes de informação que derivam dos modelos numéricos. A evolução no sentido

de resultados mais realistas e maior capacidade de análise pode contribuir para enaltecer publicamente as vantagens da utilização de sistemas solares e também em medidas de planeamento energético.

O desenvolvimento de novos métodos de obtenção de informação espacial georreferenciada como é o caso da tecnologia LiDAR tem permitido atingir maior versatilidade na criação de modelos de potencial com base em SIG. O sistema LiDAR é tipicamente composto por uma unidade laser e uma unidade computacional, montadas num veículo aéreo, e que são combinadas com uma unidade de posicionamento, de forma a permitir a georreferenciação da informação constituindo um sistema *Airborne Laser Scanning* (ALS), como ilustra a Figura 1.

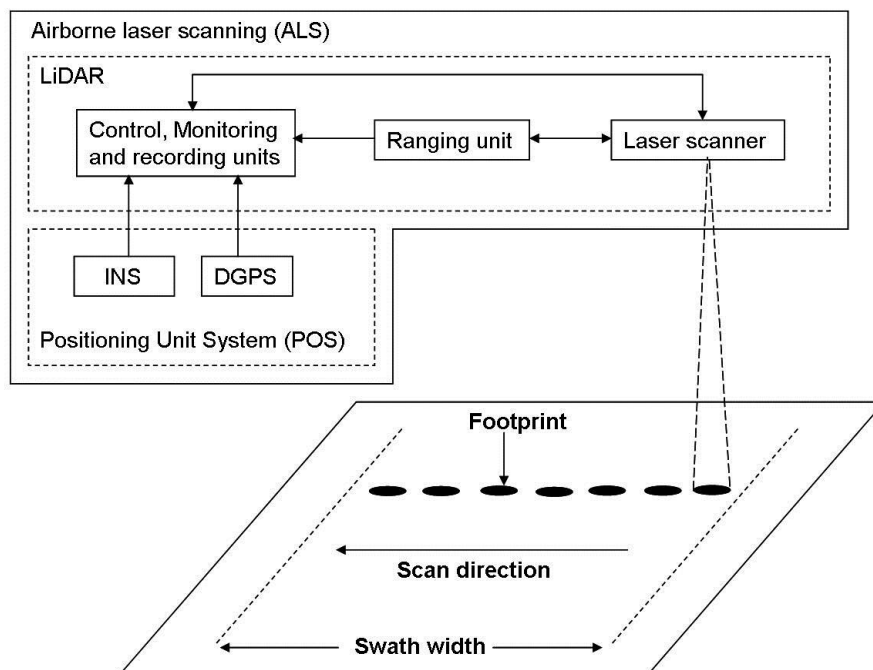


Figura 1 - Esquema de um sistema ALS (Carneiro 2011).

A unidade LiDAR faz o cálculo da distância varrida pelo laser e da posição da aeronave para cada ponto durante o varrimento. A taxa de medição do sistema ALS encontra-se entre os milhares de Hz até 200 kHz, e o diâmetro do pulso está entre os 15 e os 30 cm. A densidade das amostras varia entre 1 e 40 pontos por metro quadrado e depende do sistema e do equilíbrio entre vários parâmetros: velocidade de voo; taxa de pulsos, ângulo de varrimento e altura do voo, e para a maioria dos sistemas disponíveis, um novo pulso só é emitido depois da receção do pulso precedente. A unidade de posicionamento mede a posição absoluta, usando um sistema global de posicionamento diferencial (DGPS) e um sistema de navegação inercial (INS). O DGPS mede as coordenadas x, y, e z com uma precisão de 10 cm, e um GPS (Sistema Global de Posicionamento)

no solo é utilizado para corrigir as medições na aeronave. O INS mede a aceleração e o comportamento nos 3 eixos de rotação do avião (Carneiro 2011).

Os sistemas LiDAR de laser pulsado são utilizados mais frequentemente na aquisição de informação de paisagens urbanas, e podem diferenciar-se quanto à forma de registo do sinal de retorno como sistemas de retorno discreto e sistemas de digitalização *waveform* ou *fullwaveform*, que permitem incluir mais detalhes no registo da informação descritivo das propriedades físicas e geométricas dos elementos urbanos (Mallet & Bretar 2009).

A informação resultante de um levantamento ALS está contida numa nuvem de pontos 3D georreferenciada que segue um processo de filtragem e classificação para diferenciar tematicamente a informação contida na nuvem de pontos (É importante referir que neste trabalho, este processo não foi feito, isto é, os dados LiDAR não foram classificados. Apenas foram detetadas as fachadas do que supostamente era edifício pela avaliação do *slope* vertical das fachadas); Num primeiro passo, os ecos relativos ao chão são classificados independentemente de outros ecos, como os dos edifícios e árvores, originando dois modelos distintos: um modelo digital do terreno (DTM), e um modelo digital de superfície (DSM). É comum nas aplicações em áreas urbanas que estes modelos considerem a definição de 3 classes de elementos urbanos: chão; edifícios e árvores. O último passo do processo de classificação passa pela filtragem de medições que correspondem a ruído, *outliers*, e outros erros, como por exemplo, pontos que correspondem a objetos temporários (carros e/ou aves) ou a própria plataforma do ALS. (Carneiro 2011).

Na última década podemos evidenciar uma série de estudos publicados que descrevem metodologias de avaliação do potencial solar em ambiente urbano e que envolvem modelos com diferentes níveis de complexidade utilizados para diversos tipos de análises. Tipicamente um estudo de potencial solar compreende 3 passos fundamentais: aquisição de informação representativa da geometria, orientação e exposição da área de estudo; escolha de um modelo de radiação solar para a computação da radiação na área de estudo; processamento e análise de resultados consoante objetivo e aplicação do estudo. É importante reconhecer a abordagem hierárquica da análise do potencial solar, considerando num primeiro nível o potencial físico da área de estudo, ou seja, a quantidade máxima de energia solar que é recebida numa determinada zona. Num nível mais restrito está a consideração do potencial geográfico, onde se excluem, dentro da zona de estudo, as parcelas que estejam reservadas a outros usos, e onde a energia solar não pode ser aproveitada. Por fim, está o potencial técnico que tem em conta as questões de ordem técnica dos sistemas utilizados na conversão da energia solar. Pode também ser analisado o potencial sócio – económico a fim de avaliar as perspetivas de lucro e crescimento associados à exploração e utilização destas fontes de energia. (Izquierdo et al. 2008).

## 2.2 – Metodologia de outros estudos de potencial

Uma abordagem 2D onde é feita uma comparação da produção fotovoltaica dos telhados com o consumo da zona é aplicada por Brito et al. 2012, utilizando informação LiDAR da zona suburbana de Carnaxide no Concelho de Oeiras, Portugal. A modelação do potencial solar foi feita com recurso à ferramenta Solar Analyst, presente na plataforma ArcGIS, que permite o mapeamento e análise da radiação solar ao nível da superfície sobre uma área geográfica para períodos específicos de tempo, e tem em conta modelos atmosféricos, latitude e elevação do local, inclinação e orientação, bem como alterações diárias e sazonais ao ângulo solar e efeitos de sombreamento provocados por edifícios e topografia envolvente. Requer como dados de entrada coeficientes mensais médios da radiação direta e difusa para a área de estudo, de forma a descrever melhor a insolação local.

A metodologia é aplicada apenas às superfícies dos telhados, identificando os *pixels* correspondentes utilizando a área da pegada de construção e escolhendo apenas os pontos com inclinação inferior a 45°. Para o cálculo da produção fotovoltaica são sugeridas duas abordagens: dividir a insolação anual incidente em kWh/m<sup>2</sup>/ano por 1000 W/m<sup>2</sup> e multiplicar pela eficiência típica do sistema que se considera 80% para obter a produção em kWh/Wp/ano; ou multiplicar a insolação pelas eficiências dos módulos e do sistema, 15% e 80% respetivamente. Estas quantidades podem ser representadas através de um mapa de potencial, para identificar quais os melhores locais para a instalação de sistemas fotovoltaicos (Figura 2).

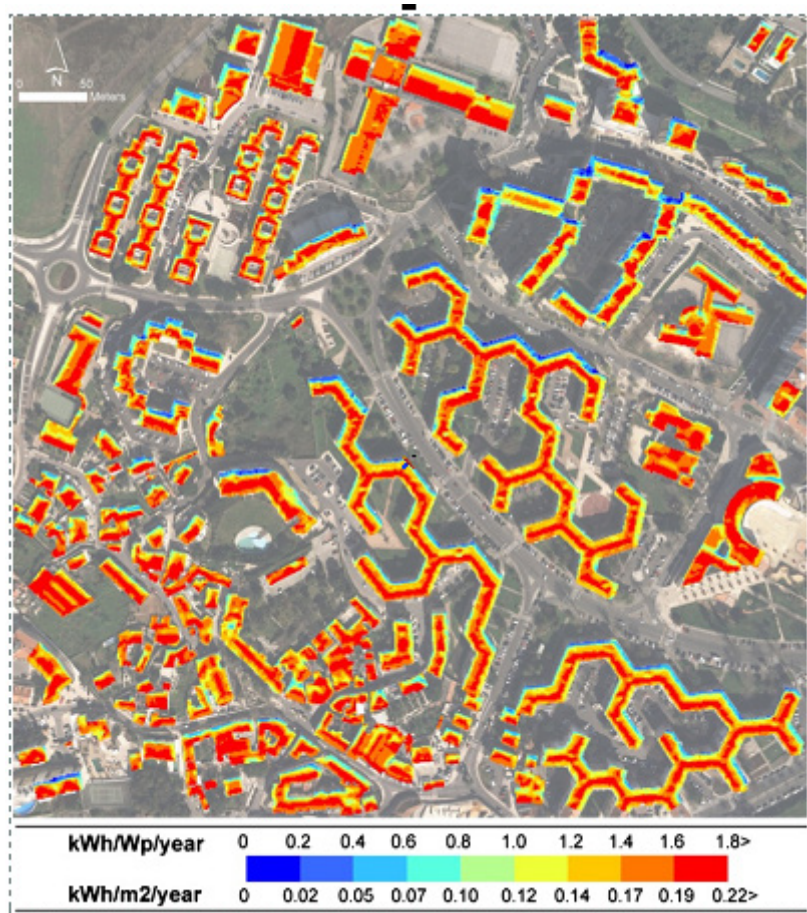


Figura 2 - Mapa do potencial fotovoltaico: Produção anual média por potência nominal instalada e por unidade de área, assumindo uma eficiência típica de 12% (Brito et al. 2012).

O consumo é estimado com base no número de residentes da área de estudo, obtido na consulta dos dados censitários de 2001 para Portugal Continental, e no consumo de energia elétrica anual *per capita*. A distribuição da população em função da pegada de construção do edifício (Figura 3).

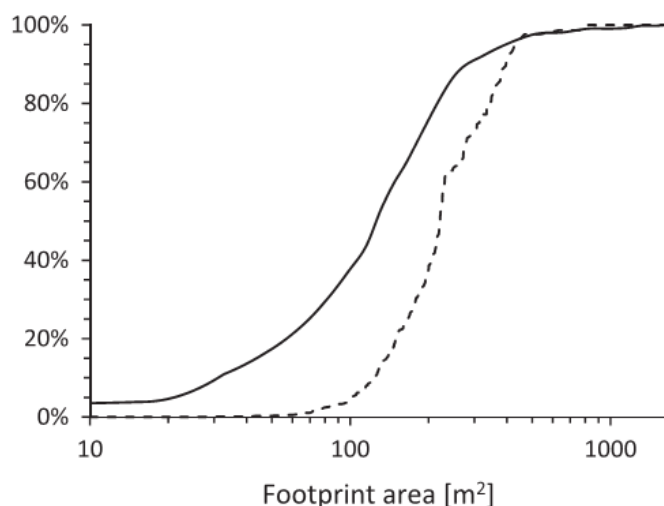


Figura 3 - Histograma cumulativo dos edifícios (linha sólida) e respetiva população estimada (linha a tracejado), em função da pegada de construção do edifício (Brito et al. 2012).

De uma amostra de 538 edifícios o modelo conclui que o potencial fotovoltaico total é cerca de 11,5 GWh/ano para uma capacidade instalada de 7 MW, o que corresponde a 48% das necessidades energéticas locais, e que para uma baixa penetração fotovoltaica (cerca de 10% da área total de telhados) a estimativa é razoável, não considerando sombreamento, para inclinação e orientação ideais, e por sua vez para uma elevada penetração (corresponde aproximadamente a toda a área disponível), a estimativa é razoável considerando a radiação na superfície horizontal equivalente à pegada de construção do edifício.

Uma metodologia semelhante é seguida por Santos et al. 2014. Utiliza também o Solar Analyst em combinação com informação da plataforma PVGIS, e tem como caso de estudo a freguesia de Alvalade, Lisboa, Portugal. O cálculo da produção PV considera uma eficiência de conversão de 14%. Os edifícios com telhados com radiação incidente inferior a 800 kWh/m<sup>2</sup>/ano não são considerados na análise. À semelhança do que é feito no estudo que aqui se apresenta, a abordagem da distribuição da população por edifício segue uma metodologia de mapeamento dasimétrico, com base nos dados disponíveis (Figura 4). São aplicados filtros de limiar de altura, e só os edifícios com alturas superiores a 2,6 metros serão considerados na distribuição da população, e a população a distribuir por edifício é proporcional à percentagem volúmica que este ocupa na subsecção pertencente. No fim da classificação do edificado, o potencial fotovoltaico dos telhados é calculado e todos eles são classificados em quartis que representam os níveis de produção (4 classes), como se mostra na figura 5.





Figura 4 - Classificação tipológica do edificado e respetiva população distribuída (Santos et al. 2014).



Figura 5 - Eletricidade produzida por painéis fotovoltaicos nos telhados dos edifícios residenciais, classificados por classes (Santos et al. 2014).

É importante referir que elementos que normalmente ocupam alguma da área dos telhados não foram considerados na análise. O resultado da classificação do edificado resulta em 760 edifícios residenciais, com um média de 12,2 indivíduos por edifício, para um total de 9628 residentes, número que difere da informação censitária (9620) por questões de arredondamento no processo de desagregação. Considerando um consumo anual *per capita* de 1300 kWh, o consumo da zona é estimado, e conclui-se que a aplicação de sistemas fotovoltaicos nos telhados dos edifícios residenciais pode contribuir com 25% da demanda energética da zona de estudo. A altura do edifício é considerada a variável que melhor descreve a tipologia do edifício, e o potencial é



representado em função da altura, donde se conclui que os edifícios mais altos, portanto, com maior volume e maior número de residentes são edifícios com uma menor fração solar, ou seja, que consomem praticamente toda a energia que potencialmente podem produzir, ao contrário dos edifícios mais baixos.

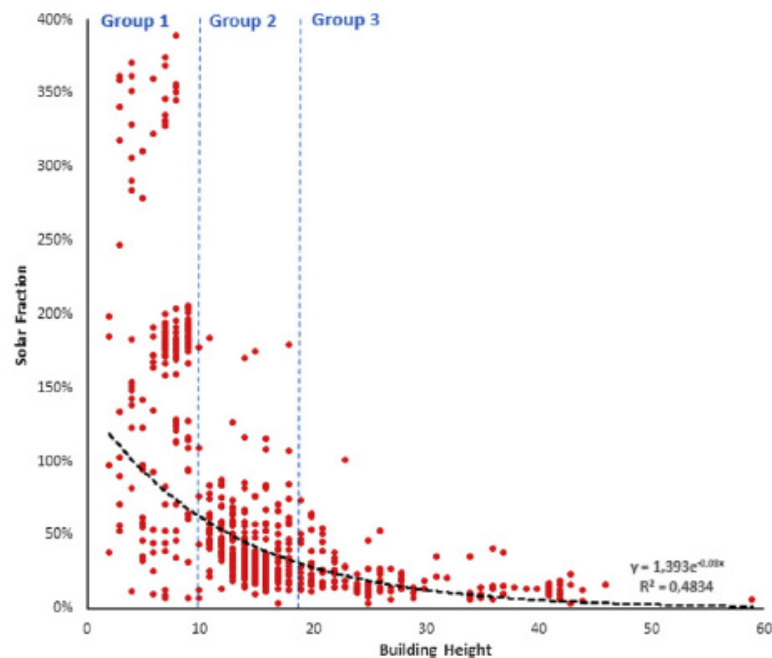


Figura 6 - Gráfico de dispersão, representado por grupos, da fração solar com um ajuste exponencial (Santos et al. 2014).

O estudo salienta ainda outras possibilidades de análise interessantes, como cruzar a informação do potencial fotovoltaico com o poder financeiro dos residentes, para perceber quais seriam os indivíduos que mais provavelmente fariam tal investimento.

Por sua vez, Jakubiec & Reinhart 2013 apresentam uma metodologia que conta com um simulador validado ao nível dos edifícios unitariamente ou em pequenos conjuntos, *Daysim*. A metodologia produz informação de irradiação para cada hora, com maior precisão geométrica, considera os efeitos de reflexão pelo contexto envolvente e usa previsões da temperatura ambiente para calcular a eficiência fotovoltaica horária. A validação foi feita pela comparação com medições feitas em duas instalações fotovoltaicas em dois telhados numa zona de Cambridge (Figura 7) e que mostraram que a metodologia pode prever em termos anuais a produção fotovoltaica com uma incerteza de 3,6 a 5,3 % quando o modelo é calibrado com dados meteorológicos reais e dados detalhados de geometria do painel, e este erro mostra ser menor que a variância que se espera da variação climatológica anualmente.

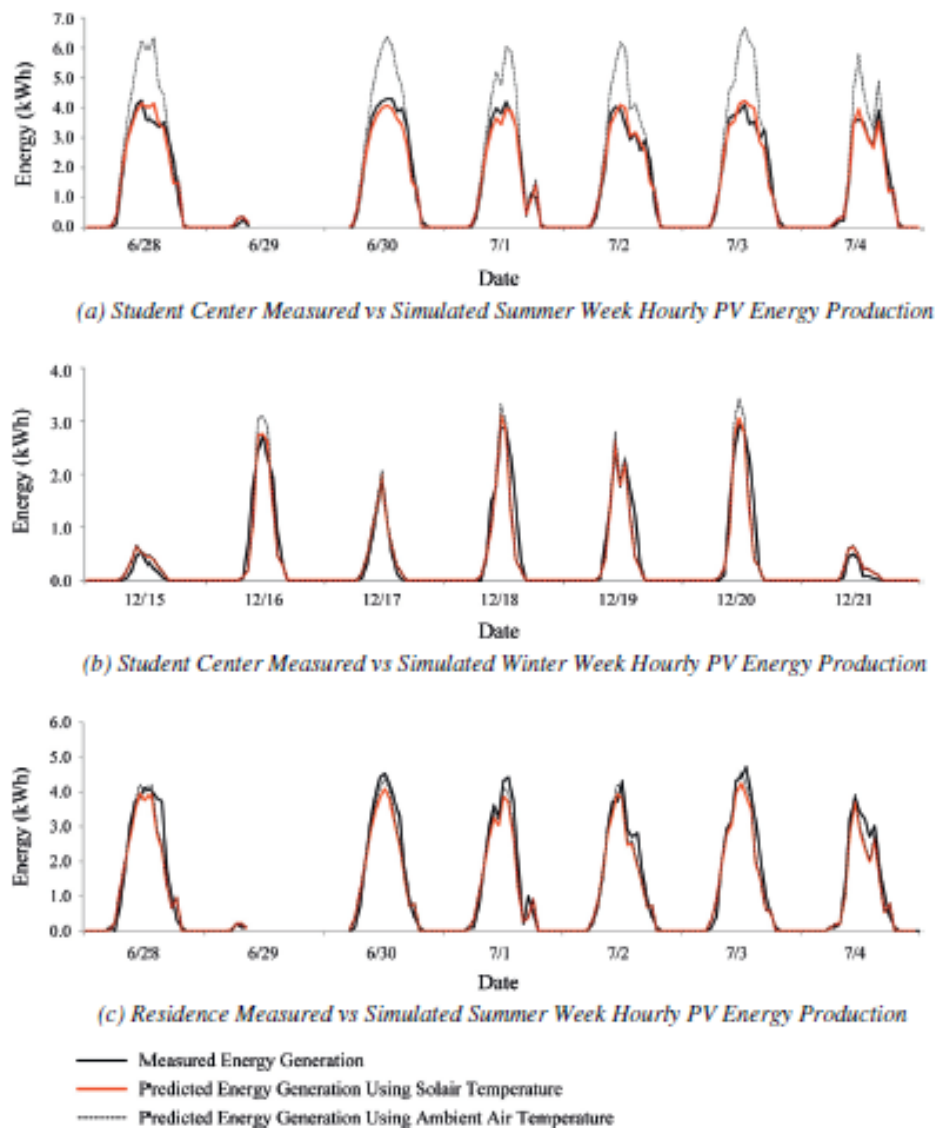


Figura 7 - Resultados horários das simulações em comparação com as medições para semanas típicas de Inverno e Verão (Jakubiec & Reinhart 2013).

Os resultados horários permitem análises do ponto de vista da mitigação dos picos de consumo a nível urbano. São também comparadas as previsões mensais de produção fotovoltaica de vários métodos, para dois casos: no sistema fotovoltaico do centro de estudos e num sistema fotovoltaico

de um agrupamento de 10 edifícios escolhidos aleatoriamente do conjunto de informação da zona de Cambridge, Boston (Figura 8).

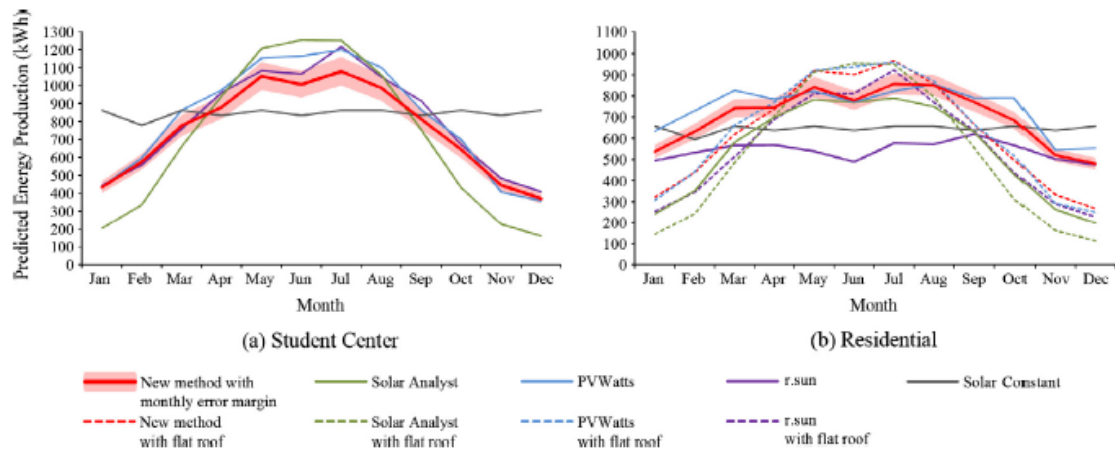


Figura 8 – Comparação das previsões mensais de vários métodos (Jakubiec & Reinhart 2013).

A metodologia utiliza um modelo tridimensional da região construído a partir de informação LiDAR, que é convertido em ambiente Raytrace que permite a calibração das propriedades óticas das superfícies, considerando as fachadas dos edifícios como superfícies Lambertianas difusoras com uma refletância de 35% e o ambiente circundante com uma refletância difusa de 20%. As refletâncias e absorvidades dos telhados são calibradas de acordo com o material constituinte.

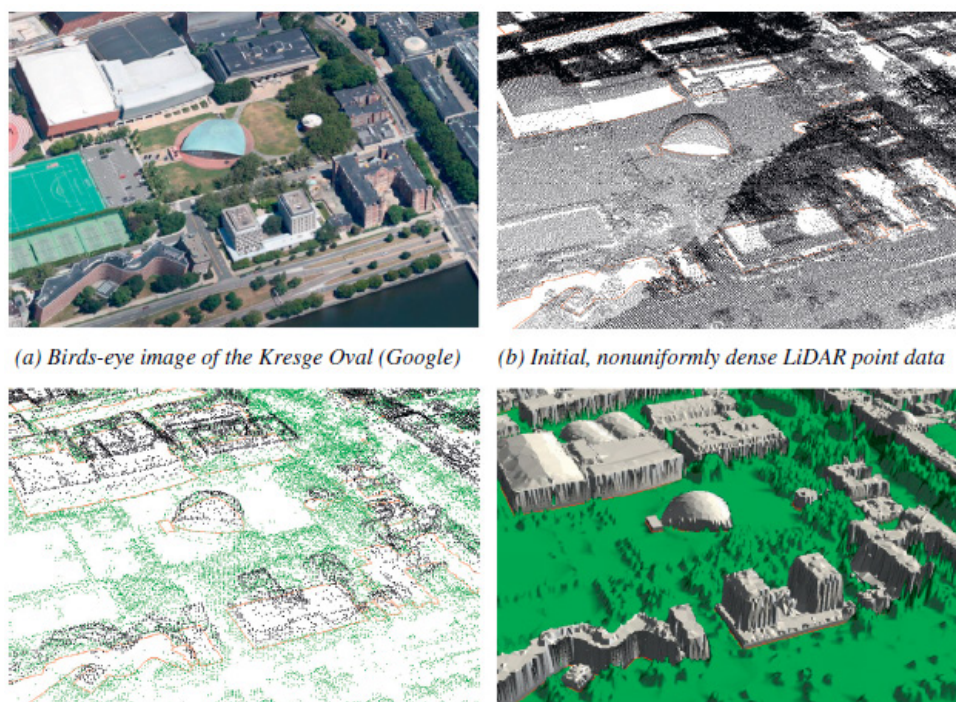


Figura 9 - Imagens do processo de criação do modelo tridimensional da área de estudo, a partir da informação LiDAR e SIG (Jakubiec & Reinhart 2013).

Os telhados com inclinação superior a  $60^\circ$  foram considerados superfícies verticais, e não foram considerados na análise, ainda que o modelo permita simular o desempenho das fachadas. As simulações de radiação são feitas para cada hora com a aplicação do modelo detalhado de Pérez (Pérez et al. 1993) e o modelo cumulativo de céu, feitas com um passo de tempo horário com o Daysim, numa grelha com  $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$ . É também usada a informação da irradiância global média e temperatura do ar para cada hora, proveniente de uma estação meteorológica.

Hofierka & Zlocha 2012 propõem uma abordagem que passa também pela criação de um modelo tridimensional do ambiente urbano para uma modelação mais rigorosa do potencial solar. O modelo 3-D da área da amostra derivou do método fotogramétrico e foi escolhido o primeiro nível de detalhe, considerado suficientemente adequado e com a vantagem de um processamento mais rápido. Partindo do modelo 3D, o módulo *v.sun* é implementado no ambiente open source GRASS GIS, que se baseia na metodologia do modelo *r.sun* Rahman and M. Pilouk 2008 para o processamento de dados vetoriais 3-D. A modelação tem em conta os efeitos de sombreamento provocados pelos elementos circundantes, usando um algoritmo de sombra. Telhados e fachadas podem estar parcialmente à sombra, os polígonos originais 3-D que as representam, têm de ser segmentados em elementos menores para alcançar a variação espacial do atributo do potencial solar. A projeção dos polígonos segmentados perpendicular ao vetor do raio solar é calculada usando uma máscara de voxels (Figura 10).

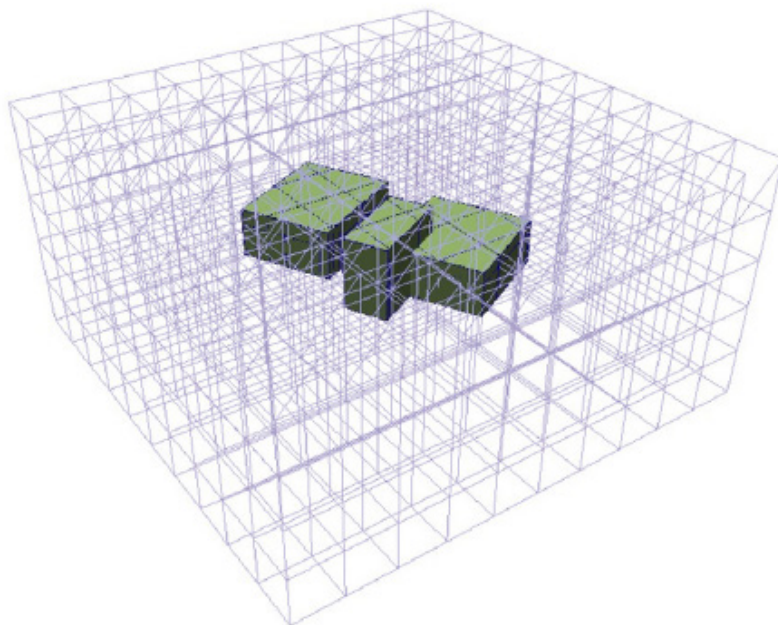


Figura 10 - Tesselação do volume utilizando o modelo de voxels, e segmentação das superfícies dos polígonos (Hofierka & Zlocha 2012).

Pode ser incorporada a abordagem sugerida por Tooke et al. 2012 para ter em conta os efeitos de atenuação provocados pela vegetação, usando voxels para representar os fatores de atenuação. Para cada passo de tempo, calcula as três componentes da radiação: direta, difusa e refletida, para condições de céu limpo ou condições reais, e os resultados são guardados numa tabela de atributos de elementos do tipo polígono (Figura 11).



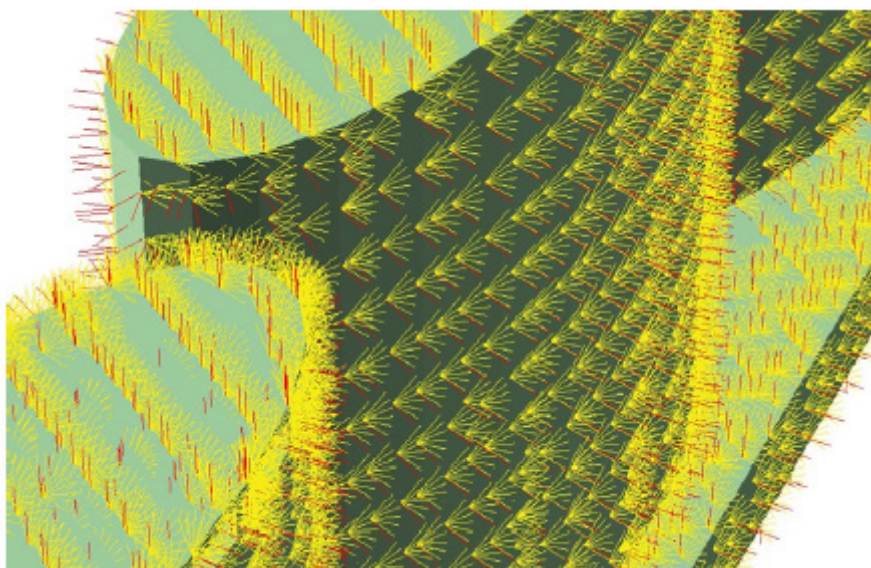


Figura 11 - Vetores normais (a vermelho) dos polígonos com um voxel de 2m e um conjunto de vetores de raios solares calculados com um passo de tempo de 1 hora (Hofierka & Zlocha 2012).

Um menor tamanho do voxel permite maior detalhe e maior precisão, mas o tempo de cálculo aumenta nestas condições. O modelo foi aplicado na área urbana de Presov, Eslováquia. A aplicabilidade do modelo foi demonstrada através do cálculo da radiação global mensal para condições de céu limpo em Janeiro e Julho (Figuras 12 e 13 respetivamente).

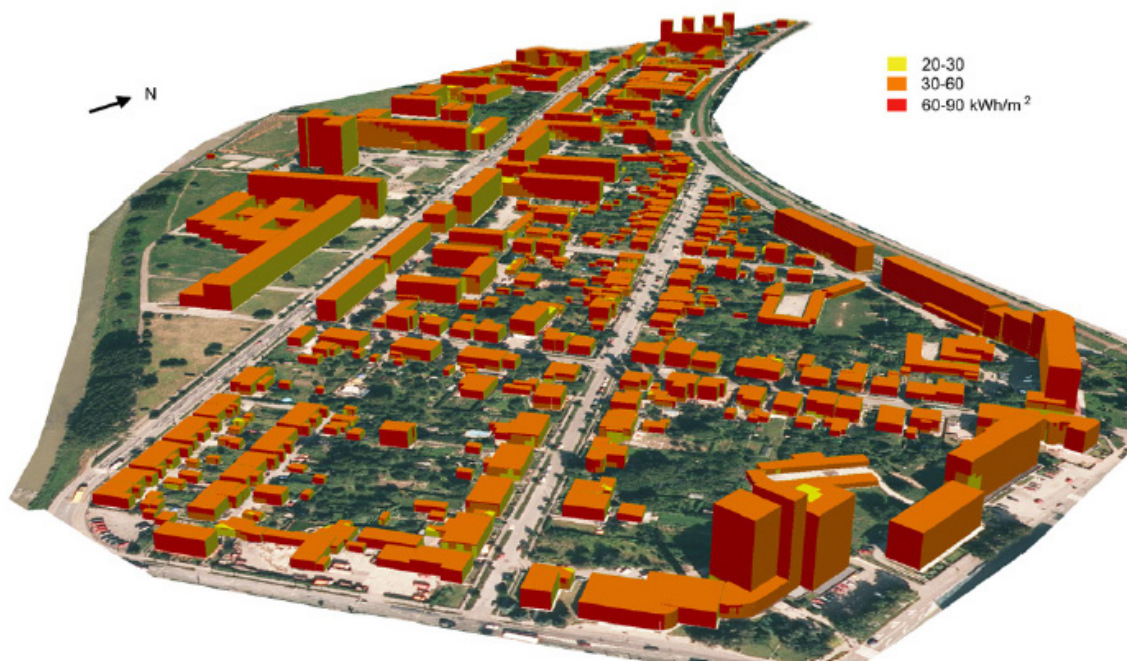


Figura 12 - Radiação solar mensal para janeiro, em condições de céu limpo (Hofierka & Zlocha 2012).

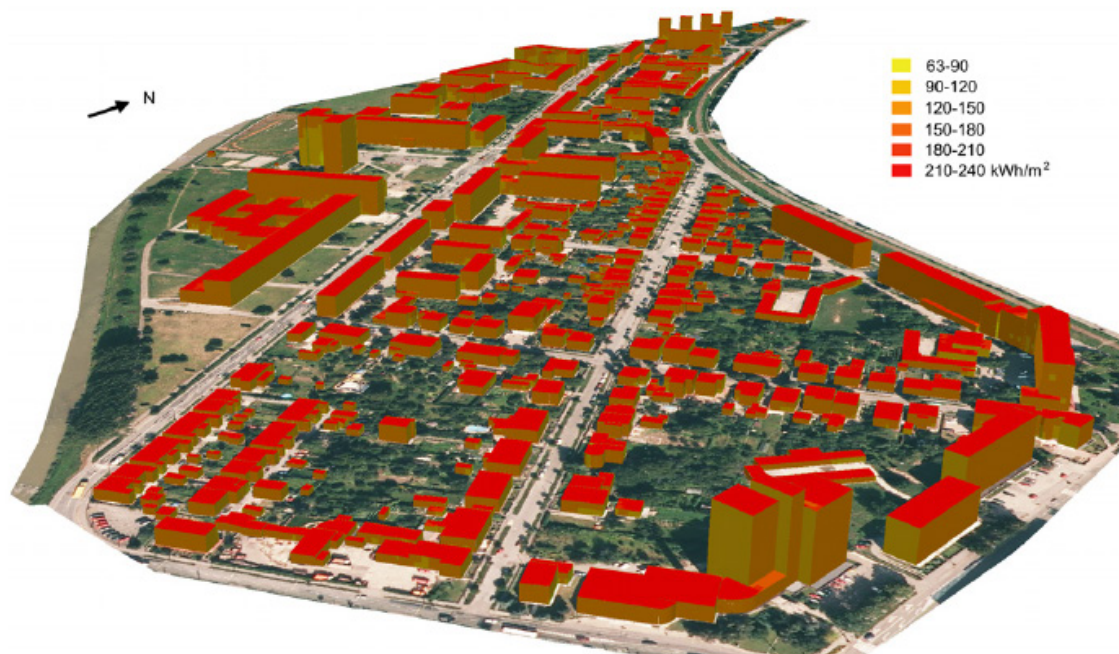


Figura 13 - Radiação global mensal para Julho, em condições de céu limpo (Hofierka & Zlocha 2012).

Não foi considerada a variação da refletância das superfícies, e também não foram incluídas as árvores nem a superfície da terra entre os edifícios. Os resultados mostram que no verão a área recebe cerca de três vezes mais radiação do que no Inverno. Em Janeiro, as fachadas orientadas a sul recebem mais radiação do que os telhados horizontais, ao contrário do que acontece em Julho. No Inverno os efeitos de sombreamento são mais relevantes.

Um outro modelo de potencial validado para superfícies inclinadas e que pode ser aplicado também às fachadas é o modelo proposto por Erdélyi et al. 2014 para o cálculo da componente difusa e direta. O modelo combina uma versão refinada do modelo anisotrópico de (Pérez et al 1993), tornando-o capaz de determinar o ângulo de incidência de cada raio difuso. O esquema da figura 14 resume as operações de cálculo da geometria solar.

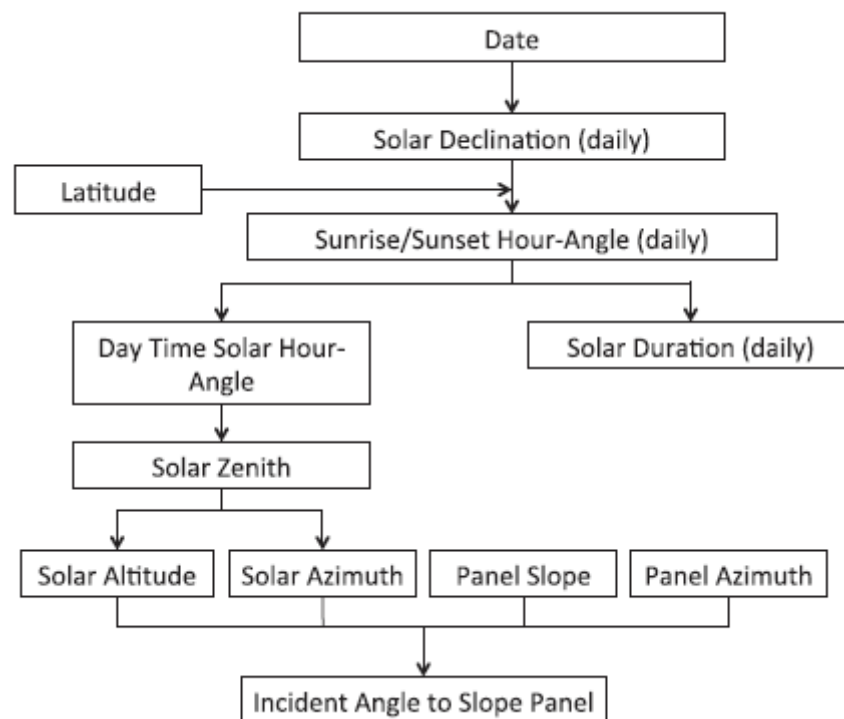


Figura 14 - Esquema do cálculo da geometria solar, utilizado para obter a altura, o azimuth, o número de horas de sol e o ângulo de incidência (Erdélyi et al. 2014).

Sabendo que cada raio solar contribui de forma diferente de acordo com a sua origem na esfera celeste, a radiação difusa de cada parte do céu é convertida num raio específico, à semelhança da computação do SVF. O algoritmo do modelo calcula também as dinâmicas tridimensionais de sombra provocadas pelos obstáculos do ambiente urbano, como edifícios e árvores, no entanto não considera a radiação refletida (Figura 15).



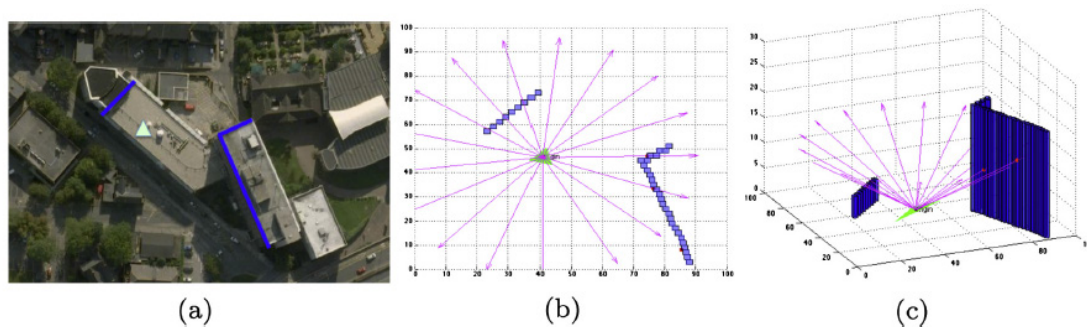


Figura 15 - (a) Imagens GoogleMaps dos edifícios da Universidade de Sheffield, Reino Unido; o triângulo verde representa a célula fotovoltaica (ou seja, a posição do piranómetro); (b), (c) Um esquema gráfico da forma como o SORAM considera os obstáculos na determinação da quantidade de radiação difusa que atinge a célula (Erdélyi et al. 2014).

São utilizadas medições empíricas de dois piranómetros instalados na área de estudo, com uma inclinação de  $12,7^\circ$ , um orientado a sudoeste e outro a sudeste. Os limites do edificado da amostra foram introduzidos com base na informação GoogleMaps™ e os obstáculos circundantes (edifícios e árvores) foram representados por voxels. A validação conclui que o modelo se comporta melhor do que o modelo proposto por Pérez et al 1993, considerando os fenómenos de sombreamento.

Carneio et al.2010, parte de um modelo digital de superfície que deriva da informação LiDAR (Figura 16), cartográfica 2D das pegadas de construção do edificado e informação altimétrica, para a cidade de Genebra, Suíça.



Figura 16 - Exemplo da informação LiDAR classificada por tipo de uso, para um bairro da cidade de Genebra (Carneiro et al.2010).

Todas as superfícies com declives superiores a  $60^\circ$  são consideradas verticais. O modelo de radiação utilizado é o modelo anisotrópico proposto por Hay, 1979. Uma rotina de Matlab é utilizada para o cálculo da radiação direta e difusa para qualquer superfície, e para condições de céu limpo. O modelo considera também as reflexões das proximidades, bem como um algoritmo de sombra e de *Sky View Factor* (SFV), para considerar os efeitos provocados pelos elementos circundantes, com recurso ao algoritmo de Ratti & Richens 2004. A utilização de um modelo urbano 3D, onde as fachadas são seccionadas a vários níveis regulares de altura, cada 3 metros, permite ultrapassar a limitação de representação de hiper-pontos do modelo 2.5D. A informação da irradiância média horária para cada mês dum ano típico foi obtida através da base de dados *Meteornorm* e pode ser utilizada para fazer análises de produção fotovoltaica ou solar térmica. A representação dos resultados pode ser feita consoante dois níveis de detalhe, para perspetivas bidimensionais das fachadas e tridimensionais para os telhados (Figura 17). Os resultados podem ser analisados ao nível das fachadas ou do edifício como um todo.

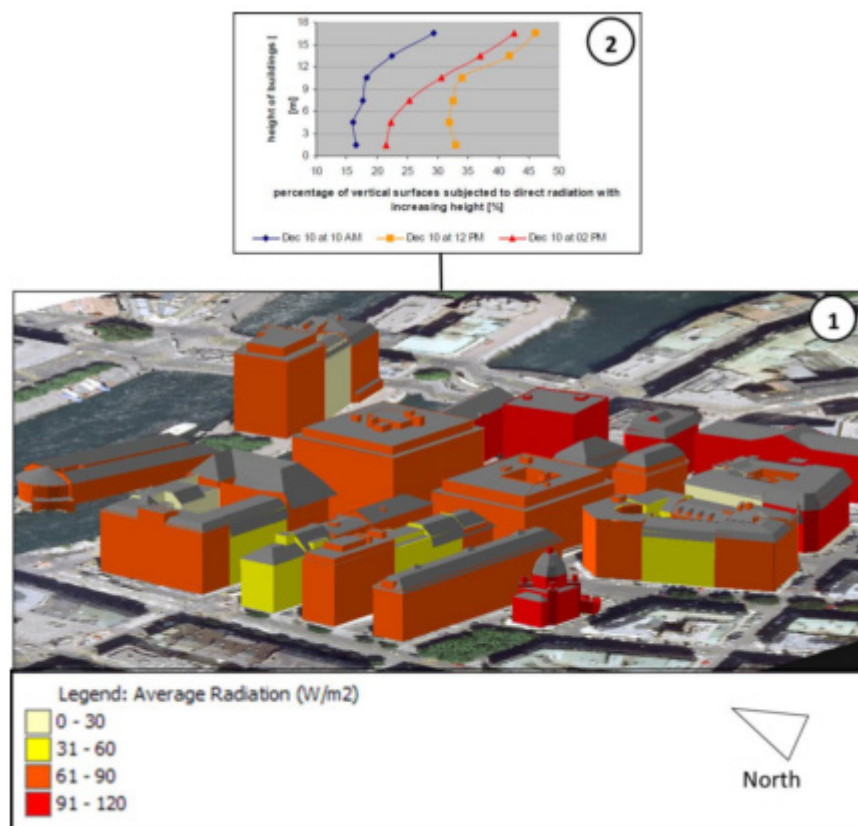


Figura 17 – Abordagem híbrida de geovisualização para mapa de radiação solar em áreas urbanas: (1) – Visualização 3D de um indicador quantitativo da radiação média nas fachadas dos edifícios ( $\text{W/m}^2$ ) no dia 10 de Dezembro ao meio dia para um bairro da cidade de Genebra; (2) – perfil gráfico com informação estatística acerca da percentagem de superfícies verticais, sujeitas a radiação direta com o aumento da altura [%] para o mesmo dia, às 10 horas, ao meio dia, e às 14 horas (Carneiro et al.2010)

Os estudos aqui descritos são representativos do estado da arte da metodologia de modelação do potencial solar em ambiente urbano na base de várias análises energéticas do recurso solar. Brito et al.2012 e Santos et al.2014 mostram que, utilizando uma metodologia que tem por base um modelo DSM, dados cartográficos 2-D do edificado e a modelação feita também em ambiente GIS, o potencial fotovoltaico dos telhados pode ser avaliado e representado em função de vários parâmetros (e.g a representação da fração solar em função da altura do edifício). O declive das superfícies dos telhados é tida em conta e limiares de área mínima para a instalação de sistemas de conversão fotovoltaicos são definidos e em ambos os estudos a produção fotovoltaica é comparada com uma estimativa do consumo dos edifícios da área de estudo, sendo que a estimativa do número de residentes por edifício proposta por Santos et al.2014 segue uma abordagem semelhante à utilizada no trabalho que aqui se apresenta e é igualmente adaptada aos dados disponíveis. No entanto, estas abordagens assumem várias simplificações quer na modelação das superfícies quer na modelação do recurso solar: por falta de maior detalhe dos

dados LiDAR que estão na base da construção do DSM, as superfícies dos telhados são consideradas planas e livres de quaisquer elementos que normalmente estão presentes (e.g chaminés, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC)); O modelo Solar Analyst considera a componente difusa da radiação como sendo igual em todas as direções do céu, e a componente da radiação refletida (nos outros edifícios, chão e árvores) também não é tida em conta. Por utilizar um modelo de superfície, que só por si não é suficientemente descritivo do ambiente urbano, esta abordagem não pode fazer considerações acerca do potencial na superfície das fachadas dos edifícios. Para este objetivo e simultaneamente para modelar com maior rigor a radiação solar tendo em conta os efeitos de sombreamento provocados pelos elementos circundantes, a criação e utilização de modelos 3-D é determinante e tal é ilustrado nos trabalhos de Hofierka & Zlocha 2012, Jakubiec et al.2013 e Erdélyi et al.2014. É importante salientar o facto de estas duas metodologias terem sido validadas para várias condições de céu na modelação da radiação nas superfícies dos telhados e poderem ser estendidas às superfícies das fachadas. Algumas contribuições importantes feitas por Jakubiec et al.2013 ao nível da análise do potencial técnico são a consideração da temperatura sol – ar no cálculo da eficiência de produção, e a consideração das propriedades óticas das superfícies de interesse. Por sua vez o SORAM (Erdélyi et al. 2014) apresenta a possibilidade de modelar a segmentação do céu permitindo maiores hipóteses de escalabilidade para outras regiões de análise assim como aumentar a precisão da modelação da componente difusa anisotrópica. Uma vez que tem em conta o ângulo de incidência de cada raio solar (direto ou difuso) permite calcular a radiação para superfícies com formas mais complexas. Pode também incorporar informação relativa às coordenadas da posição do sol, proveniente de seguidores solares de dois eixos. Carneiro et al.2010 fornecem a metodologia de base a respeito da construção das fachadas por hiper-pontos a partir de um modelo urbano 3D que é utilizada no programa SOL com o mesmo objetivo.

Neste contexto pode afirmar-se que os diferentes modelos e estudos existentes evoluem na busca de maior precisão através da superação das limitações dos modelos precedentes. As limitações existentes derivam em parte da precisão das ferramentas de recolha de dados e por vezes da própria adequabilidade dos dados disponíveis; pode tomar-se como exemplo os erros produzidos no processamento dos dados LiDAR. Por outro lado, alguns modelos escolhem considerar a componente difusa de uma forma mais simplista para conseguirem resultados em menos tempo de computação. A este respeito, o *software Daysim*, apesar de não ter sido aplicado às fachadas dos edifícios, é dos que apresenta melhor desempenho com elevado nível de detalhe. A representação das superfícies é também um aspeto determinante na precisão e rigor dos modelos. Muitos modelos consideram as superfícies planas, e na realidade podem estar parcialmente ocupadas por estruturas de utilidade dos edifícios, no caso das superfícies dos telhados, ou janelas, no caso das fachadas. Uma melhor representação da vegetação é necessária para melhor avaliar a

complexidade da sua interação com a radiação. A validação geral destas metodologias é extremamente importante mas é uma tarefa que requer bastantes casos de estudo para compreender as possibilidades de escalabilidade dos modelos propostos, dado que o recurso solar é dependente do tempo e do local, e que pode ser conseguida à medida que os modelos propostos se tornarem mais consensuais nas suas abordagens.

### **3 – Metodologia do estudo**

#### **3.1 Escolha das zonas de Interesse**

Num primeiro momento é necessário escolher zonas dentro do município para analisar. Procuram-se duas zonas com características distintas: uma zona com características mais adequadas à penetração da radiação solar nas fachadas dos edifícios e uma outra zona com características menos boas a este respeito. Estas zonas podem ser seleccionadas de uma forma empírica, ou seja, quando os edifícios alvo são mais altos do que os seus vizinhos e estão suficientemente afastados para que se minimizem os efeitos de sombreamento, ou seja, quando as ruas são relativamente mais largas, estamos, à partida, perante uma zona com melhores características. Neste caso, mesmo que não haja uma grande variabilidade nas alturas dos edifícios, desde que haja um dado grau de afastamento entre eles, evitar-se-á um maior grau de sombreamento mútuo. O contrário verifica-se quando os edifícios são mais baixos que os seus vizinhos e/ou estão demasiado próximos. Isto é, em ruas mais estreitas, os efeitos de sombreamento irão fazer-se notar de uma forma mais acentuada, caracterizando uma zona como sendo menos boa para aproveitamento solar em fachadas.

São necessários, portanto, dados cartográficos georreferenciados, que digam respeito aos limites urbanos do município de estudo e também à morfologia dos edifícios presentes. Para efeitos de estatística do ordenamento do território nacional, um município é uma divisão administrativa, que está repartida em divisões censitárias: as secções e subsecções. Através do sítio do Instituto Nacional de Estatística (INE, 2011) pode obter-se informação geométrica devidamente classificada numa estrutura vetorial no formato *shapefile*, relativa às divisões censitárias do município de Lisboa, como se apresenta na Figura 18, resultante do processamento de informação do último levantamento censitário realizado em 2011, bem como informação tabular complementar, em formato *csv*, que será também utilizada em ambiente *ArcMap 10™*, e que contém informação variada referente aos atributos, incluindo, por exemplo, o número de indivíduos residentes em cada subsecção estatística. A subsecção estatística está representada pelo código BGRI11 (Base Geográfica de Referência de Informação, para o ano de 2011), nas tabelas de atributos destas estruturas de dados vetoriais.

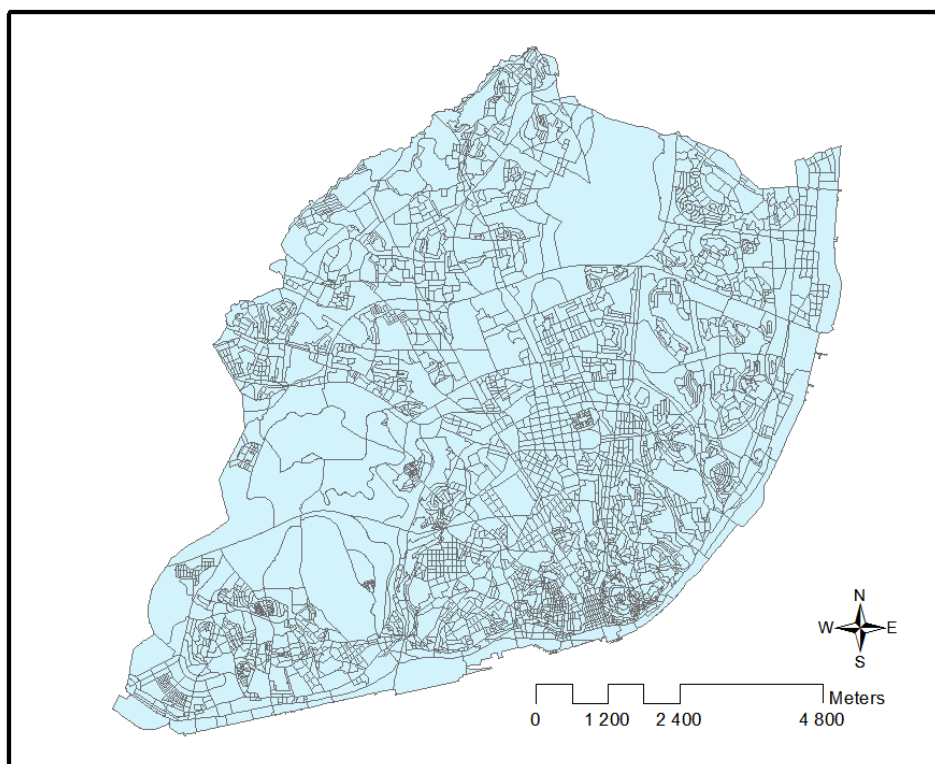


Figura 18-Mapa das secções censitárias 2011. (Instituto Nacional de Estatística 2011).

Além desta camada de informação (*layer*) foi também necessário adquirir a geometria 2D do edificado do município de Lisboa (Figura 19), a qual foi obtida por digitalização a partir da cartografia à escala 1:25000, do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE). Com base nessa geometria, foram calculados os centróides das pegadas do edificado (Figura 20). De seguida, através de uma operação de extração de valores da grelha LiDAR para o centróide de cada polígono de edifício, o valor de cota de edifício ficou associado ao ponto que representa o seu centróide. As alturas dos edifícios foram obtidas pela diferença entre as alturas da base, provenientes de um modelo digital do terreno (DTM) e as cotas de topo extraídas para o centróide. Criou-se assim um novo *layer* de pontos, que serviu como aproximação para estimar a altura dos edifícios.

Em algumas situações, o facto de os centróides estarem fora dos limites dos polígonos e o facto dos limites dos polígonos estarem demasiado generalizados na cartografia 1:25000 provocou a existência de *outliers*. Foram, portanto, filtrados todos os elementos com alturas inferiores a 3.5 metros, para excluir as alturas negativas e os polígonos que não representam edifícios, assumindo que o limiar de 3,5 metros é uma consideração razoável da altura de mínima de um edifício com uma habitação ou uma moradia.



Figura 19- Cartografia do edificado disponível numa primeira fase do trabalho, inseridos nas respetivas divisões censitárias.



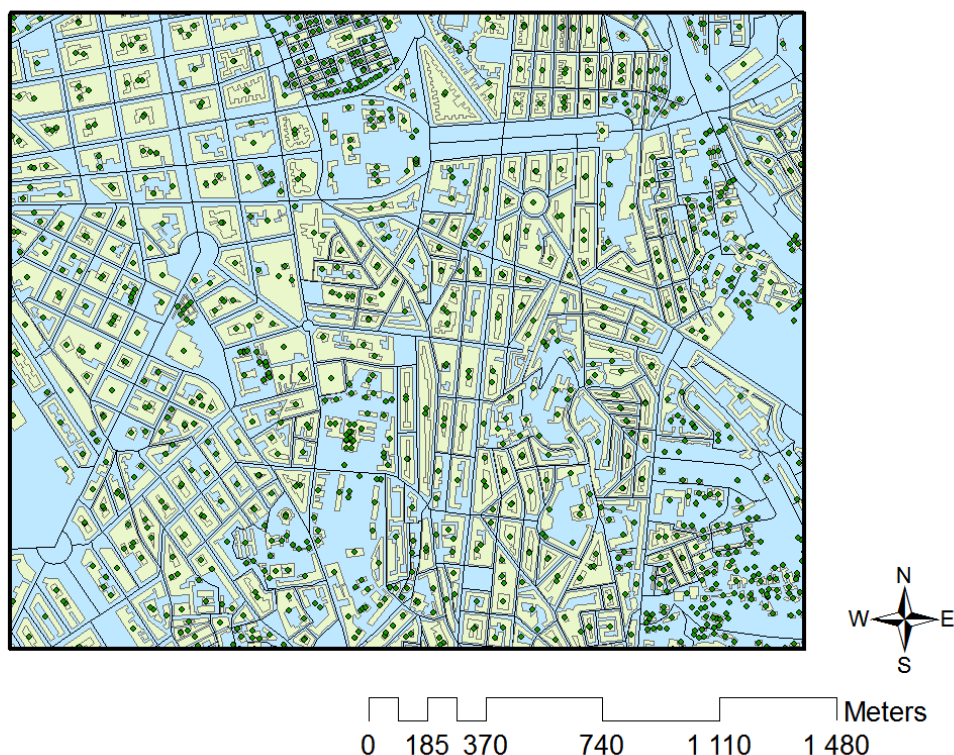


Figura 20 - Pontos centróides dos polígonos que representam os edifícios, inseridos no mapa de divisões censitárias.

### 3.1.1 – Indicador de densidade do edificado

Com base nas noções empíricas acima discutidas, tentou criar-se uma relação matemática que as pudesse representar. Assim o indicador de densidade do edificado (IDE) é definido pela seguinte relação:

$$IDE = \frac{\% \text{ Área dos edifícios na subsecção}}{\text{Altura média dos edifícios na subsecção}} \quad (1)$$

O numerador da Equação 1 é apontado como um indicador de densidade urbana, nomeadamente o índice de ocupação do solo (Carneiro et al.2010). O IDE é tanto maior quando menor for a altura média dos edifícios e maior for a área construída (e portanto mais estreitas as ruas). Assim, numa zona “boa” obter-se-ão valores inferiores aos de uma zona “má”.

A fim de averiguar duas áreas de interesse, os dados disponíveis referidos na secção anterior foram processados. São calculadas as áreas de todos os polígonos da cartografia do edificado e dos polígonos da cartografia das divisões censitárias. Seguidamente, através duma operação de



análise espacial, a informação tabular, com os atributos dos três *layers*, é agregada com rigor espacial. O resultado é um novo *layer* do tipo ponto, que contém toda a informação considerada relevante informação necessária à construção do IDE, numa só tabela de atributos que passaremos a chamar *tabela IDE*. Dentro desta tabela de atributos são criados os campos com a percentagem de área, a altura média, e os valores do IDE.

### 3.1.2 - Implementação do indicador

Para uma melhor compreensão dos resultados os valores do IDE vão ser representados num mapa de densidade. Foi por isso utilizada a função *point density* (Figura 21) que faz parte das ferramentas de análise espacial do ArcMap 10, e que permite criar este tipo de mapas. A implementação da função é descrita de seguida.

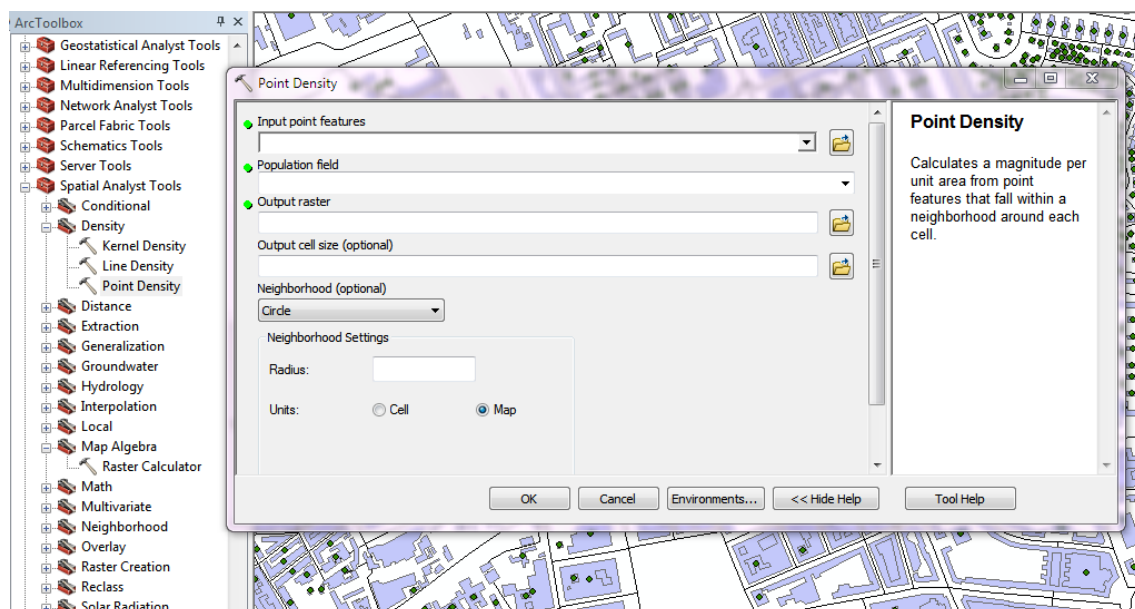


Figura 21 - Janela de implementação da função point density.

Como informação de saída tem-se uma superfície contínua (grelha *raster*) composta por várias células dimensionadas *à priori* (Neste caso foi utilizada a dimensão proposta por defeito, portanto, 21,84 metros). Depois, para cada célula da grelha, a função calcula a densidade dos elementos do tipo ponto em seu redor. Conceptualmente, a vizinhança é definida em torno do centro de cada célula, e o número de pontos que estão compreendidos pela vizinhança é totalizado e dividido pela área da mesma. Na definição da função existe um campo designado *Population Field*, no qual se especifica a quantidade a ser usada no cálculo da grelha *raster* e que determina o número de vezes que determinado ponto é contabilizado (por exemplo, uma entrada com o valor 3 iria implicar que esse ponto fosse contado como três pontos). Portanto cada elemento é ponderado a partir do atributo da tabela do *layer* que o utilizador definir.

Ao definirmos uma unidade de área, a densidade calculada para a célula é multiplicada pelo fator apropriado antes de ser escrita na grelha de saída, isto é, se as unidades de entrada estiverem em metros, comparando a unidade do fator de escala de metros para quilómetros irá resultar em valores sendo diferentes por um multiplicador de 1,000,000 ( $1,000 \times 1,000$ ). O raio de vizinhança também é definido *à priori*; neste caso foi escolhido o valor de 300 metros, considerado razoável como dimensão da área compreendida num quarteirão.

### 3.1.3 - Resultados

As figuras 22, 23 e 24, apresentam as grelhas de densidade obtidas, classificadas de acordo com a altura média dos edifícios, a percentagem de área ocupada pelos edifícios, e o IDE, respetivamente.

A observação dos mapas de densidade mostram que no presente caso, a relação que traduz o indicador tem uma maior dependência da percentagem de área, do que da altura média, o que pode querer dizer que o IDE é um medidor dominado pela distância dos edifícios na subsecção, sendo menos sensível às alturas relativas numa determinada vizinhança.

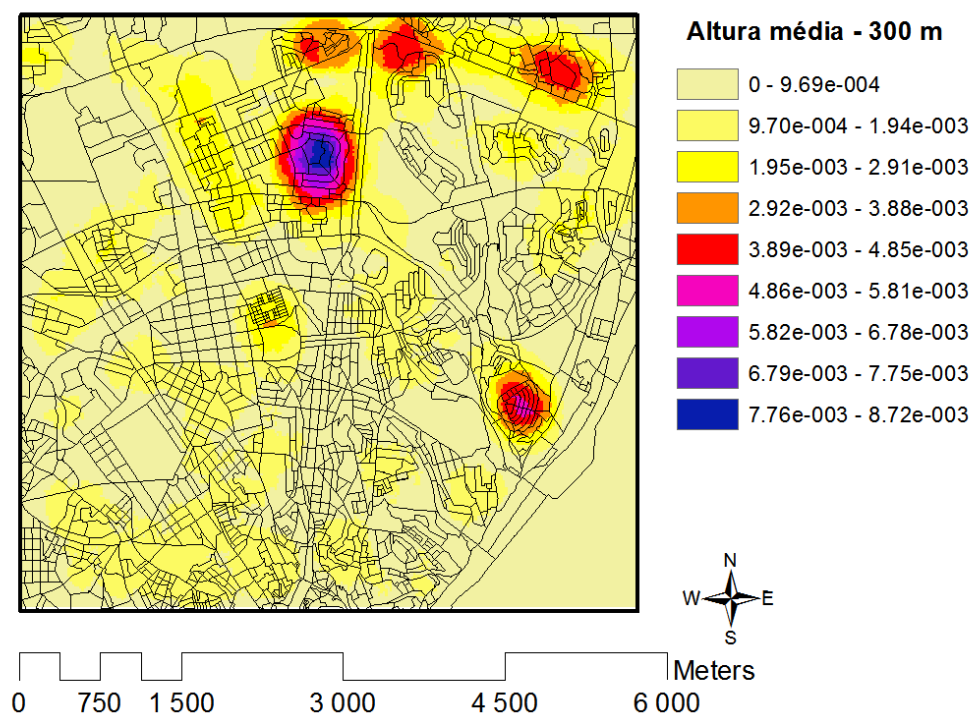


Figura 22 - Resultados da função point density para a Altura Média dos edifícios de uma subsecção.

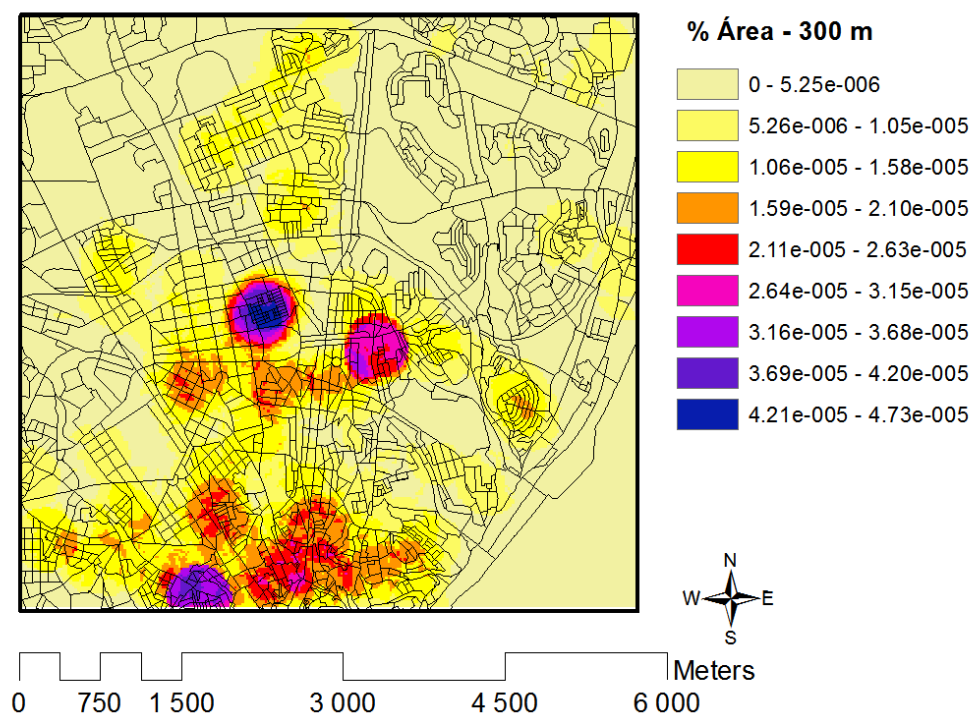


Figura 23 - Resultados da função point density para a percentagem de área dos edifícios de uma subsecção.

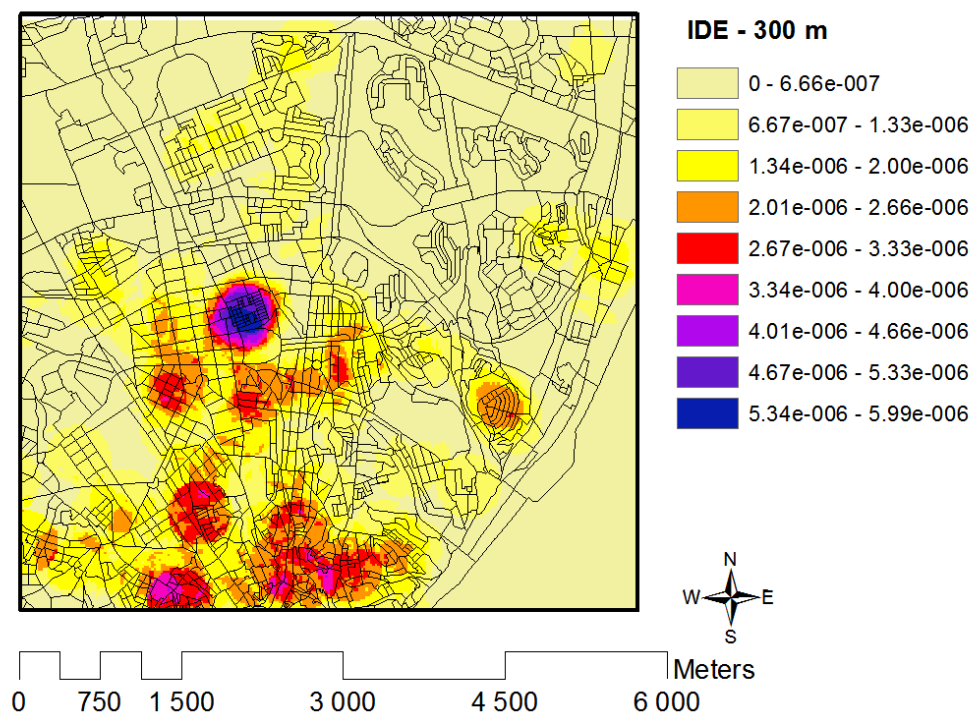


Figura 24 - Resultados da função point density para o IDE.

A qualidade do IDE depende bastante da qualidade dos dados utilizados. A este respeito podem evidenciar-se vários aspetos que podem ter influenciado os resultados e consequentemente a escolha das amostras, tais como, o facto de a cartografia de base disponível do edificado estar demasiado generalizada para a escala 1:25000, e apresentar polígonos individualizados que podem, na verdade, corresponder a vários polígonos, isto é, na representação haver um polígono que representa uma agregação de polígonos. Este problema é evidenciado pela comparação da cartografia utilizada com a cartografia disponível na plataforma *web* da Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa Interativa™. Na Figura 25 pode observar-se que a cartografia de base desta plataforma apresenta-se muito menos generalizada. Como já foi referido anteriormente, os pontos correspondentes a alturas negativas foram filtrados, e mais uma vez, a comparação com a cartografia da Lisboa Interativa evidencia vários casos de polígonos com áreas significativas dentro da subsecção que foram por isso excluídos. Tais aspetos contribuem certamente para uma classificação incorreta das subsecções onde tal se verifica, e apontam para a necessidade de uma reclassificação com melhores dados cartográficos.



Figura 25 - Comparação da cartografia de base da plataforma Lisboa Interativa à escala de 1:5000 (à esquerda) com a cartografia de base à escala 1:25000 utilizada para a criação do indicador (à direita).

Ainda assim, pode afirmar-se que o indicador criado é um bom método para uma análise preliminar, pois permitiu identificar regiões interessantes que apresentam de facto alguma

coerência com a percepção empírica que provêm do conhecimento da cidade. No entanto, a escolha das amostras mais coerentes sugeridas pelo indicador devem ser complementadas com uma análise local.

### 3.1.4 – Seleção das amostras

Foram facilmente identificadas zonas com classificações contrastantes. Dentro dessas zonas foram escolhidos conjuntos de edifícios de interesse pelas relações de vizinhança a respeito da altura, e estes foram localizados, em imagens áreas e em vista de rua, na plataforma GoogleMaps<sup>TM</sup>.

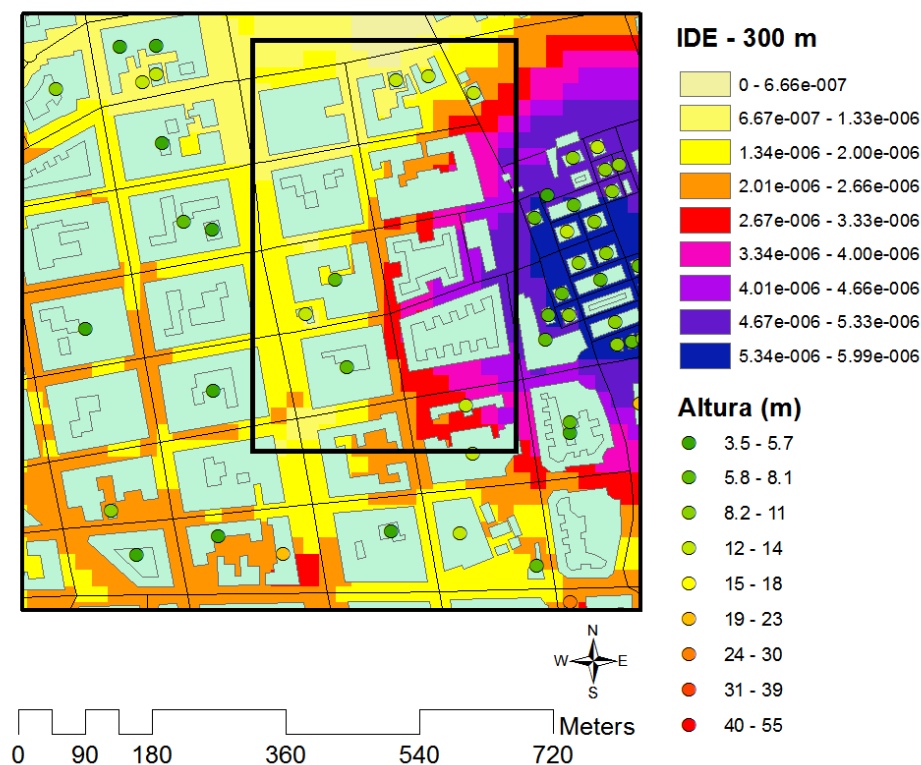


Figura 26 - Seleção da zona da amostra com características “menos boas” (Zona A).



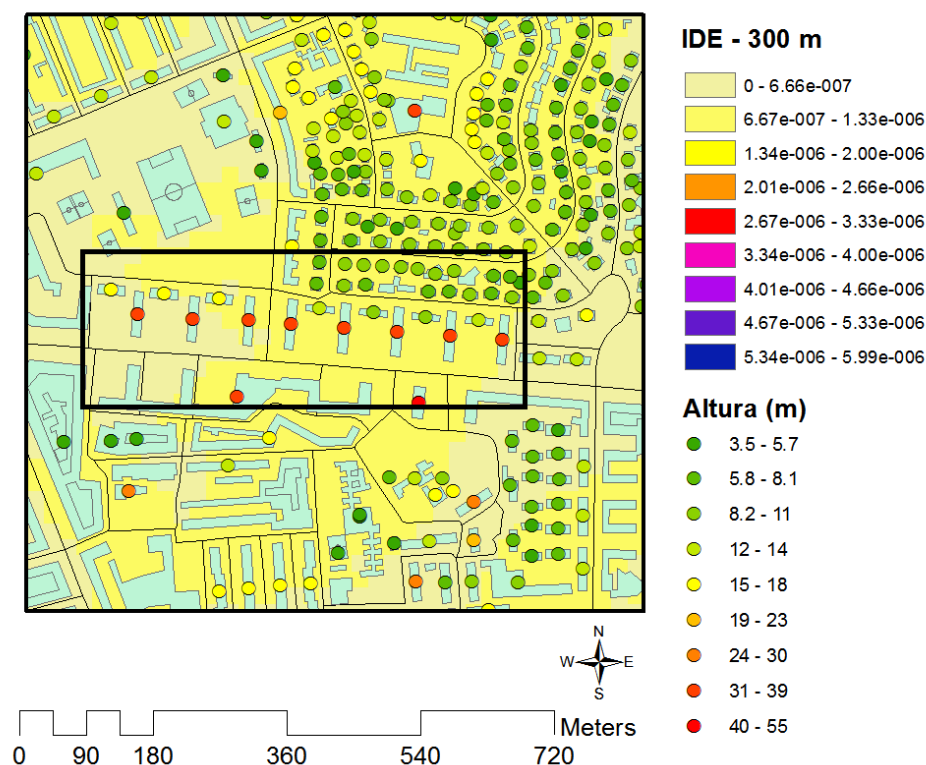


Figura 27- Seleção da zona da amostra com boas características (Zona B).

Na Figura 26, o mapa de densidades apresenta valores elevados para o indicador, ou seja, uma zona com características menos boas para o aproveitamento da radiação solar nas fachadas, como foi explicado anteriormente. Na Figura 27 verifica-se o contrário, o que indica que estamos perante uma zona com boas características. As classes de alturas diferenciam-se no mapa pela cor do centróide, sendo o vermelho - escuro a que possui valores mais elevados. A esta classe pertencem todos os edifícios de interesse da região com boas características. Devido à má contabilização do número de edifícios por polígono, discutida no ponto anterior, é importante comparar entre as duas figuras qual a percentagem de área dos edifícios não contabilizados, e verifica-se que estão entre os 40% e 50% de percentagem de área, para os dois casos. Assim sendo, a sua representação no mapa de densidades é praticamente a mesma, o que permite concluir que a classificação obtida é coerente. Os conjuntos de edifícios escolhidos estão integrados em duas zonas que apresentavam uma classificação coerente com a realidade. A figura 28 mostra as fachadas com orientação Este, nos dois locais e realça o efeito da proximidade entre os edifícios na criação de padrões de sombreamento. A figura 29 mostra a vista de satélite de ambas as zonas.



Figura 28 - Imagens street view via GoogleMaps™ do espaço entre edifícios, para a zona menos boa à esquerda e para a zona boa à direita.

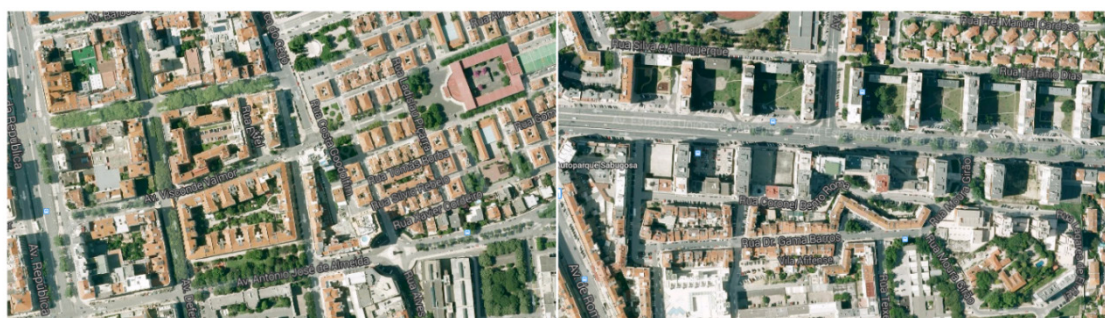


Figura 29 - Imagens satélite via GoogleMaps™, para a zona menos boa à esquerda e para a zona boa à direita.

Estas duas regiões serão então as amostras a estudar. A região “menos boa”, que vamos daqui em diante chamar de região A está perto da Avenida da República e Avenida Elias Garcia e a “região boa”, que passaremos a chamar de região B, está na Avenida Estados Unidos da América.

### 3.1.5 – Caracterização correta da amostra

Com uma cartografia do edificado menos generalizada para as zonas das amostras produzida pela Câmara Municipal de Lisboa, uma cartografia qualidade, com uma vectorização menos generalizada, à escala de 1:15000. Neste conjunto de informação, os valores das alturas e das áreas são mais corretos e é interessante fazer a representação do IDE com estes novos dados para perceber como se altera a classificação destas regiões. Os resultados mostram-se nas Figuras 30 e 31.

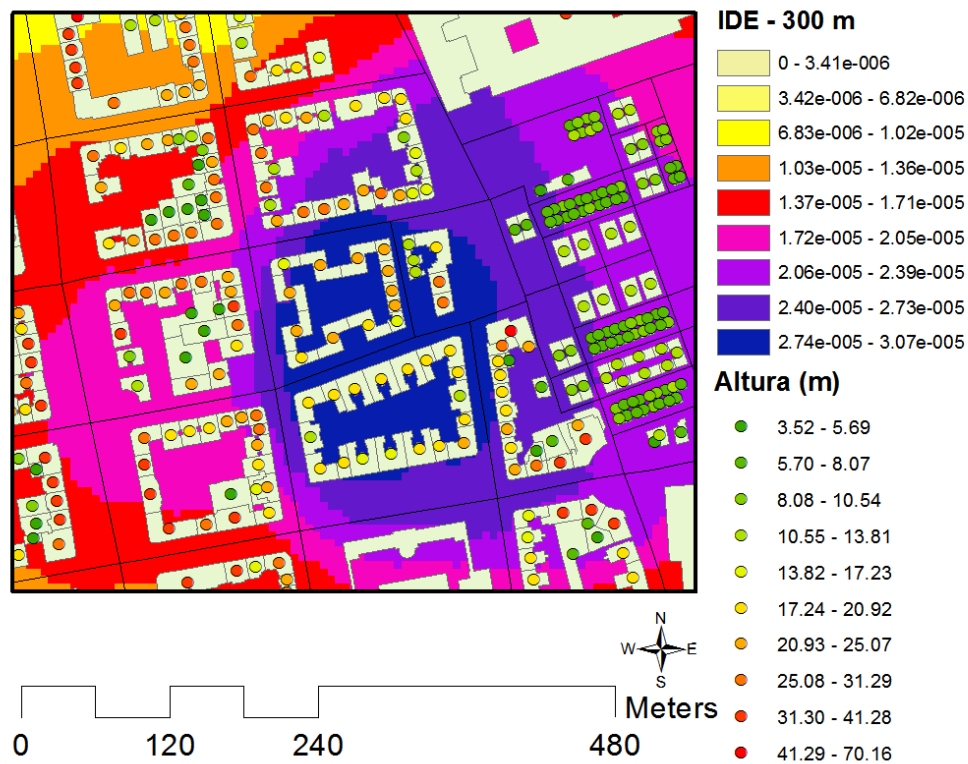


Figura 30 - Caracterização das amostras com o indicador construído com uma cartografia menos generalizada. Zona B.

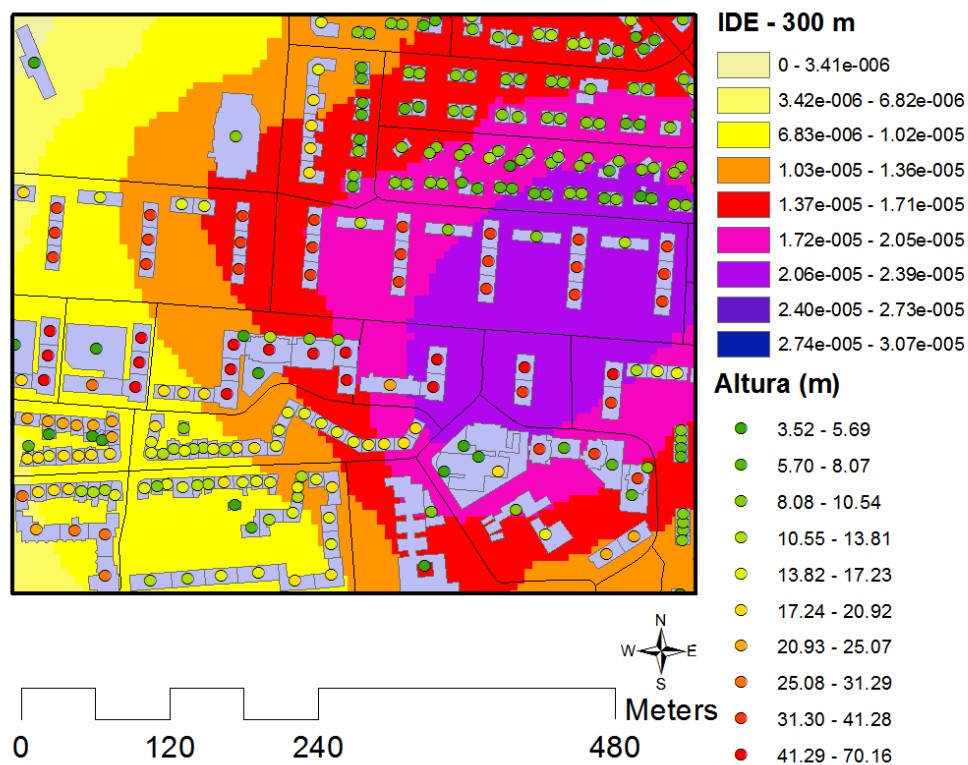


Figura 31 - Caracterização das amostras com o indicador construído com uma cartografia menos generalizada. Zona B.



Observa-se que o IDE aponta agora a zona B como uma zona “menos boa”, especialmente para um dos quarteirões de maior interesse, ainda que continue mais bem classificado do que os edifícios de interesse da zona A.

Tal como foi verificado na primeira implementação, o indicador mostra ser mais dependente da percentagem de área do que da altura média. A má classificação da região B deve-se ao método de cálculo da função *point density*. Como já foi dito a função *point density* cria uma grelha de *pixels* e calcula a densidade de pontos em torno de cada um destes *pixels*, de acordo com um determinado raio de busca, ponderando a distância a cada ponto de acordo com um determinado atributo dos pontos. As superfícies de densidade mostram onde os pontos estão mais concentrados, como o resultado da inclusão de todos os pontos que estão contidos na circunferência com raio definido (300 metros, nas figuras 30 e 31). Ao contabilizá-los, individualmente, tantas vezes quanto o valor do indicador para um dado ponto e dividindo pelo fator de escala (que neste caso foi 1, uma vez que escolhemos apresentar a densidade por metro quadrado), o quarteirão vai ser classificado, não só pelo valor do indicador dos polígonos pertencentes, mas também pelos valores dos indicadores de outros polígonos cujos pontos que os representam estejam contidos na circunferência com um determinado raio de procura.

Se diminuirmos o raio para cerca de um terço do escolhido inicialmente as superfícies de densidade tornam-se mais adequadas às expectativas. As figuras 32 e 33 apresentam esses resultados.

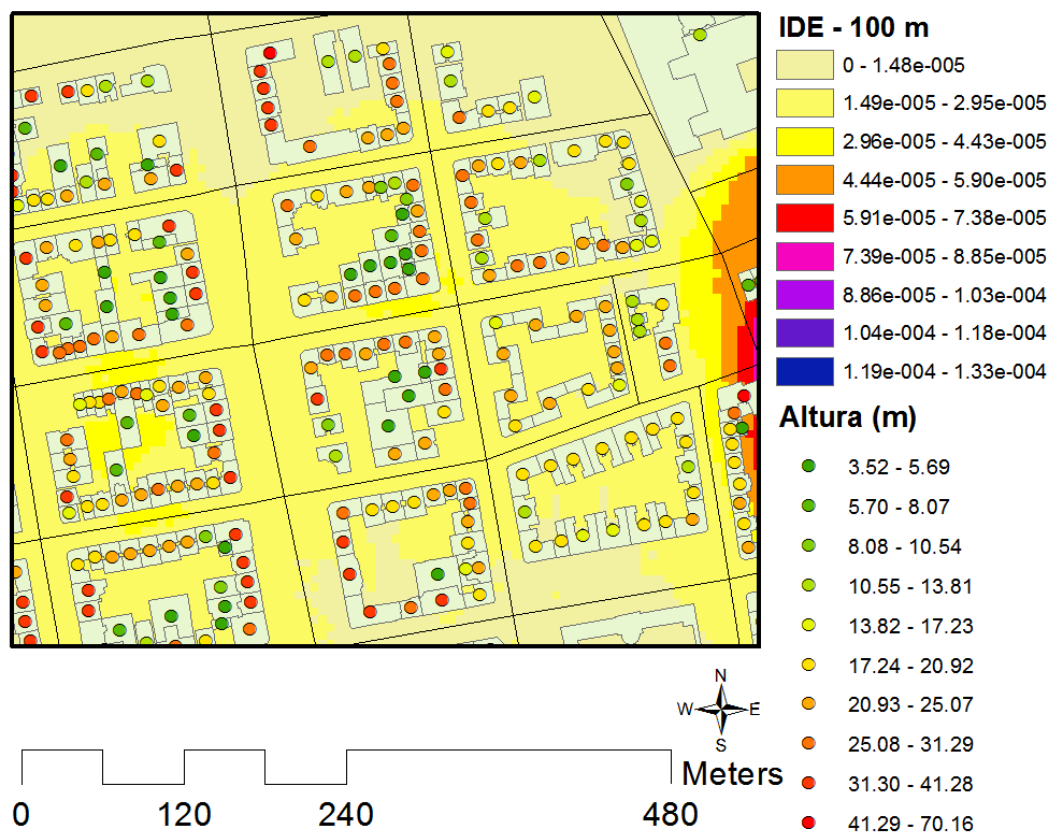


Figura 32 - Resultados da função point density para o indicador, quando o raio de vizinhança da função é 100 metros. Zona A.

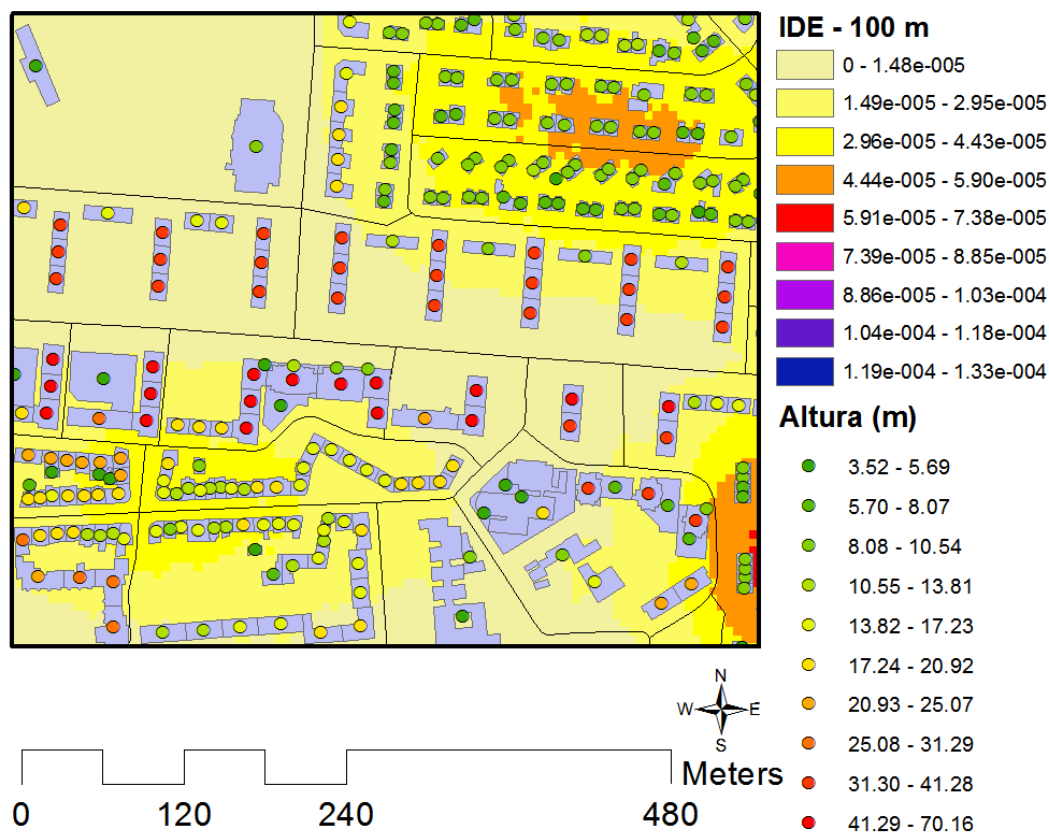


Figura 33 - Resultados da função point density para o indicador, quando o raio de vizinhança da função é 100 metros. Zona B.

A redução de o raio para 100 metros melhora a classificação da zona B, mas melhora também a classificação da zona A. No entanto num dos bairros de interesse da zona B, o indicador é em uma ordem de grandeza inferior a qualquer dos bairros de maior interesse da zona A. A análise da tabela de atributos das camadas respectivas confirma essa situação, inclusive para o bairro mais mal classificado. A tabela 1 mostra o desvio padrão, o valor médio e o valor máximo do IDE para um raio de pesquisa de 300 e 100 metros, para as duas zonas.

	IDE 300 m			IDE 100 m		
	Valor médio	Desvio padrão	Valor máximo	Valor médio	Desvio padrão	Valor máximo
Zona A	$1,60 \times 10^{-5}$	$6,66 \times 10^{-6}$	$3,07 \times 10^{-5}$	$2,18 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-5}$	$1,34 \times 10^{-4}$
Zona B	$1,33 \times 10^{-5}$	$4,97 \times 10^{-6}$	$2,36 \times 10^{-5}$	$1,85 \times 10^{-5}$	$1,37 \times 10^{-5}$	$6,58 \times 10^{-5}$

Tabela 1- Parâmetros da distribuição de valores do IDE para um raio de 300 m e 100 m para as duas zonas.

Note-se que é de esperar que a ordem de grandeza do raio de vizinhança a considerar seja dependente da altura dos edifícios, e portanto dependente da morfologia da cidade. Neste caso, corresponde a cerca de 3 a 5 vezes a altura média dos edifícios da zona.

### 3.2 – Estimativa da população por edifício

A metodologia descrita em seguida é apresentada no esquema *workflow* da figura 34.

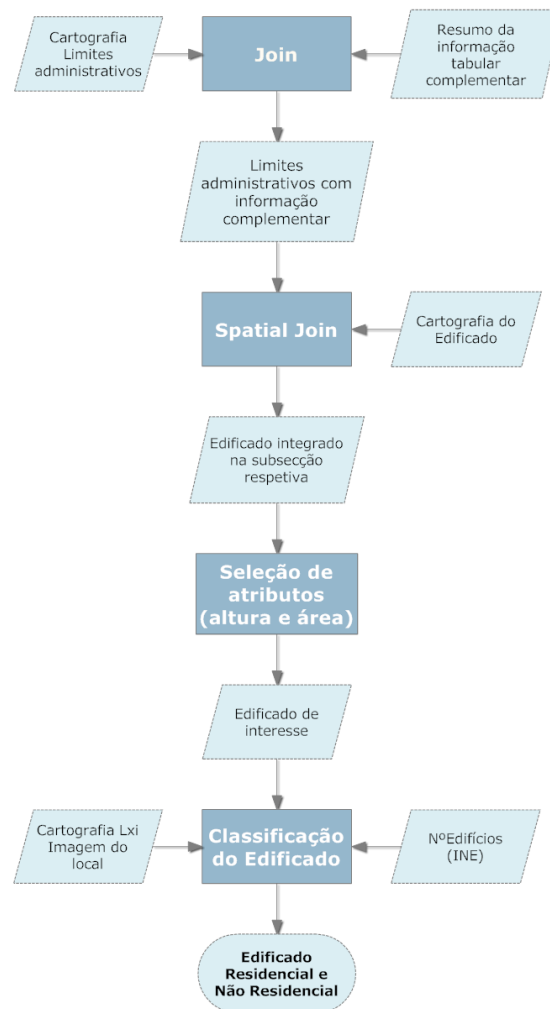


Figura 34 - Esquema Workflow do processo de classificação da tipologia do edifício.

Em parte, a informação de base desta metodologia são os dados relativos à população, disponibilizados pelo INE, e que datam do último levantamento censitário correspondente ao ano de 2011. Para este objetivo a informação censitária não pode ser usada diretamente como está estruturada, uma vez que está demasiado agregada, isto é, a informação censitária disponível para cada município está dividida em 4 unidades geográficas, da maior para a mais pequena: município, freguesia, secção, e subsecção, correspondendo esta última ao quarteirão.

Assim, para estimarmos o número de pessoas num zonamento não coincidente com os polígonos das zonas censitárias precisamos de fazer uma interpolação. Esta interpolação pode ser feita recorrendo a uma técnica de mapeamento dasimétrico (Freire & Gomes 2010). O mapeamento dasimétrico é um método de mapeamento temático que utiliza símbolos de área para classificar espacialmente a informação. É usado especialmente para mapas de densidade populacional em detrimento de outros métodos dada a capacidade de distribuir mais realisticamente essa informação em termos geográficos, permitindo assim limitar a distribuição da variável às áreas em que de facto está presente através da utilização de dados auxiliares que com esta estejam relacionados, no processo de interpolação zonal. Neste caso, vamos distribuir a informação relativa à população presente num quarteirão por edifícios residenciais que estejam dentro desse quarteirão e será a pegada de construção do edifício a unidade de homogeneidade desta distribuição.

Resumidamente, esta metodologia pode dividir-se em três passos: obtenção da informação relativa à cartografia do edificado, seleção e organização da informação auxiliar relacionada, que permita fazer uma diferenciação das zonas residenciais, dos edifícios residenciais dos não residenciais ou dos de utilidade residencial, sendo também possível terminar com a diferenciação quanto ao tipo de edificado residencial (prédio ou moradia). O terceiro passo é aplicar o modelo de desagregação da população total da subsecção para os edifícios de carácter residencial pertencentes, podendo o modelo incluir parâmetros de peso conforme o edificado seja do tipo prédio ou moradia. Estes mesmos fatores de ponderação são calculados com base em subsecções que tenham apenas edifícios residenciais de um tipo.

O modelo utilizado na metodologia apresentada é o modelo areométrico que foi proposto por Lwin & Murayama 2007, com a incorporação de um fator de ponderação que varia quanto ao tipo de edificado, por sua vez proposto por Ural et al. 2011. As equações 2, 3, 4 e 5 representam os modelos de desagregação propostos por estes autores.

$$BP_i = \left( \frac{CP}{\sum_{k=1}^n BA_k \cdot BH_k} \right) BA_i \cdot BH_i \quad (2)$$

Nesta equação, o termo  $BP_i$  corresponde à população do edifício  $i$ , que é igual à razão entre a população da subsecção censitária,  $CP$ , e o somatório do produto entre a área do edifício  $k$ ,  $BA_k$ , e a altura média do edifício  $k$  (via *LiDAR*),  $BH_k$ , finalmente multiplicada pelo produto entre a área do edifício  $i$ ,  $BA_i$ , e a altura média do edifício  $i$ ,  $BH_i$ .

É de notar que o somatório do denominador engloba apenas os edifícios da mesma subsecção.

$$BP_i = \left( \frac{CP}{\sum_{k=1}^n BV_k} \right) BV_i \quad (3)$$

Na equação 2, os termos  $BH_i$ ,  $BA_i$ ,  $BA_k$  e  $BH_k$  são substituídos pelo termo  $BV_i$ , que corresponde ao volume do edifício obtido através dos dados LiDAR, substituindo por consequência o somatório e o produto  $BH_i \cdot BA_i$  da equação 1.

A diferença fundamental entre a equação 2 e a equação 3 está na utilização do volume obtido diretamente via LiDAR em vez de o calcular com o produto entre a área e altura média também obtidas via LiDAR.

$$P_i = \frac{w_i^s S_i}{\sum_{k=1}^n w_k^s S_k} P_c \quad (4)$$

Na equação 4 apresenta-se o modelo proposto por Ural et al. 2011, sendo  $S_i$ , o volume ou a área do edifício  $i$ ,  $S_k$  o volume ou a área do edifício  $k$ ,  $P_i$  a população a distribuir pelo edifício  $i$ ,  $P_c$  a população total da subsecção censitária,  $n$  o número total de edifícios nessa subsecção e  $w_k$  e  $w_i$ , os fatores de ponderação para os edifícios  $k$  e  $i$ . Tendo em conta estes fundamentos para o modelo de desagregação, vamos seguir a equação areométrica proposta por Lwin & Murayama 2007, com a incorporação dos fatores de peso propostos por Ural et al. 2011, como se mostra abaixo.

$$Pi = \left( \frac{CP}{\sum_{k=1}^n BA_k \cdot BH_k w_k^s} \right) BH_i \cdot BA_i \cdot w_i^s \quad (5)$$

A metodologia de desagregação é implementada em ArcMap 10, utilizando a informação cartográfica já descrita anteriormente, e informação auxiliar da plataforma Lisboa Interativa GoogleMaps™, e do conjunto de informação censitária do INE. As figuras 35 e 36 mostram a cartografia das pegadas do edificado para a zona A e para a zona B, respetivamente.

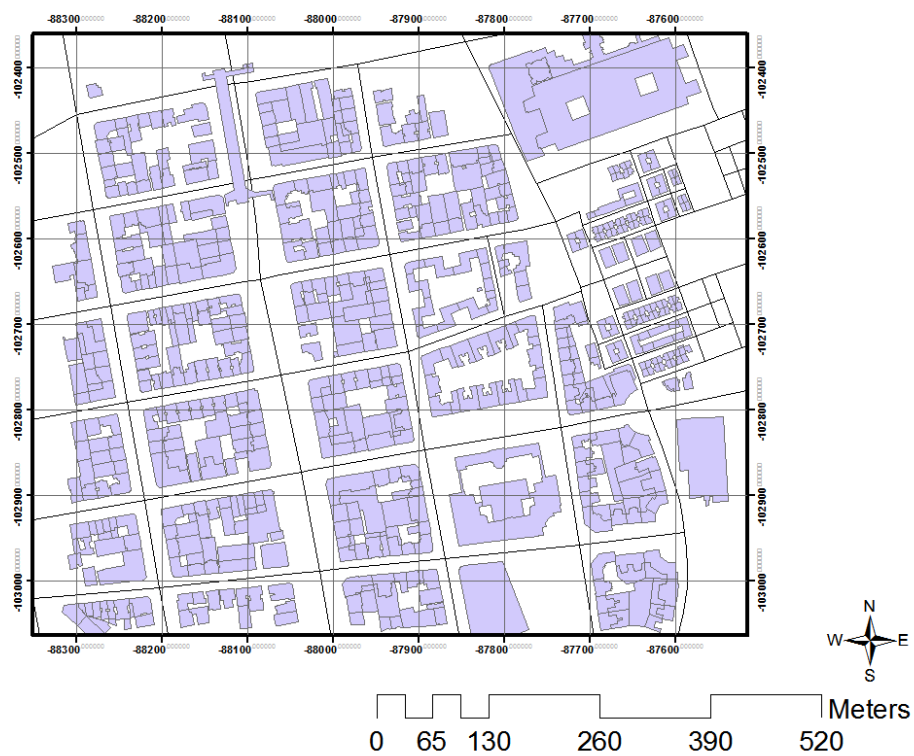


Figura 35 - Representação cartográfica das pegadas do edificado (a lilás) e dos eixos de via (a preto) da região A, à escala 1:15000.



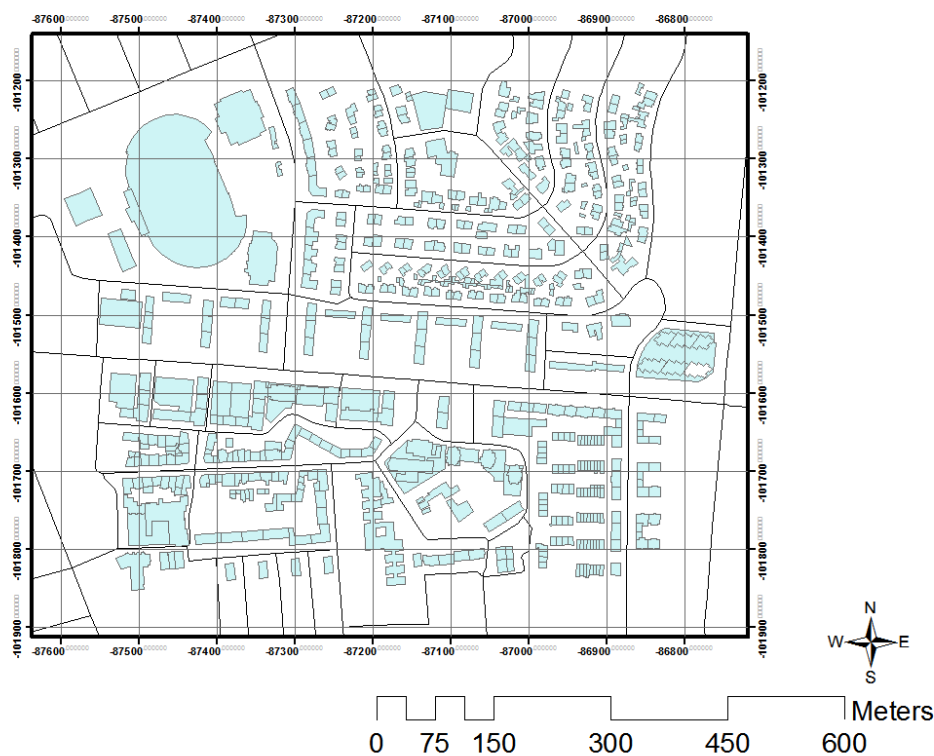


Figura 36 - Representação cartográfica das pegadas do edificado (a azul ciano) e dos eixos de via (a preto) da região A, à escala 1:15000.

BGRI2011_11061							
GEO COD	GEO COD DSG	NIVEL	N EDIFICIOS CLASSICOS	NIVEL DSG	N EDIFICIOS CLASSICOS 10U2	N EDIFICIOS	
11060100107	Ajuda	8	25	Subsecção	24		
11060100108	Ajuda	8	5	Subsecção	4		
11060100109	Ajuda	8	7	Subsecção	7		
11060100110	Ajuda	8	31	Subsecção	30		
11060100111	Ajuda	8	8	Subsecção	8		
11060100112	Ajuda	8	6	Subsecção	6		
11060100113	Ajuda	8	40	Subsecção	40		
11060100114	Ajuda	8	48	Subsecção	48		
11060100115	Ajuda	8	2	Subsecção	2		
11060100201	Ajuda	8	0	Subsecção	0		
11060100202	Ajuda	8	27	Subsecção	16		
11060100203	Ajuda	8	20	Subsecção	1		
11060100204	Ajuda	8	10	Subsecção	0		
11060100301	Ajuda	8	0	Subsecção	0		
11060100302	Ajuda	8	17	Subsecção	17		
11060100303	Ajuda	8	20	Subsecção	20		
11060100304	Ajuda	8	6	Subsecção	5		
11060100305	Ajuda	8	66	Subsecção	66		
11060100306	Ajuda	8	31	Subsecção	31		
11060100307	Ajuda	8	8	Subsecção	8		
11060100308	Ajuda	8	23	Subsecção	23		
11060100309	Ajuda	8	22	Subsecção	22		
11060100310	Ajuda	8	24	Subsecção	24		
11060100311	Ajuda	8	25	Subsecção	25		
11060100312	Ajuda	8	24	Subsecção	24		
11060100313	Ajuda	8	22	Subsecção	22		
11060100401	Ajuda	8	5	Subsecção	0		
11060100402	Ajuda	8	8	Subsecção	6		
11060100403	Ajuda	8	11	Subsecção	4		
11060100404	Ajuda	8	9	Subsecção	8		
11060100405	Ajuda	8	4	Subsecção	0		

Figura 37 - Tabela de informação censitária auxiliar.

A informação censitária complementar (Figura 37) contém uma série de atributos estatísticos relevantes para a análise ao nível da subsecção: o número de indivíduos residentes, o número de edifícios principal e exclusivamente residenciais, a freguesia em que se insere a subsecção, entre outros. São feitas operações de análise espacial para integrar com rigor espacial o edificado na subsecção correspondente e agregar a informação tabular. Os novos *layers* resultantes têm para a zona A e zona B 645 e 625 polígonos, respetivamente. O processo de classificação do edificado prossegue com a aplicação de filtros para a excluir polígonos que têm alturas e áreas com valores muito pequenos, e também negativos no caso das alturas. Como já foi referido no capítulo anterior, correspondem ou a erros do levantamento LiDAR na produção da cartografia (alturas negativas) ou a objetos espaciais que não correspondem a edifícios, (árvores, veículos), ou ainda, não sendo edifícios propriamente ditos podem corresponder a edificado de utilidade residencial (garagens, quintais, pátios, arrecadações), todos estes cartografados como polígonos. Áreas inferiores a 40 m<sup>2</sup> e alturas inferiores a 3,5 m foram excluídas. Esta filtragem reduz o número dos polígonos para a zona A e zona B de 645 para 526 e de 625 para 502, respetivamente.

O conhecimento da classificação tipológica do edificado é importante para distinguir o edificado residencial do não residencial. Embora a tabela de atributos da cartografia do edificado não apresente a classificação tipológica do edifício, pode ser feita uma pesquisa na plataforma Lisboa Interativa™ utilizando o código de SIG. Esta pesquisa foi útil para excluir da cartografia, com mais confiança, os polígonos que correspondiam por exemplo a espaços/pátios interiores dos edifícios e que não foram removidos com a aplicação dos filtros de limiares de área ou altura. Nas situações em que vários polígonos partilham o mesmo código de SIG, a pesquisa na Lisboa Interativa™ permite perceber qual é o polígono que de facto representa o edifício, permitindo também ativar várias camadas temáticas de visualização e pode apresentar a classificação tipológica através de uma legenda. A análise teve de ser feita polígono a polígono, para cada quarteirão,

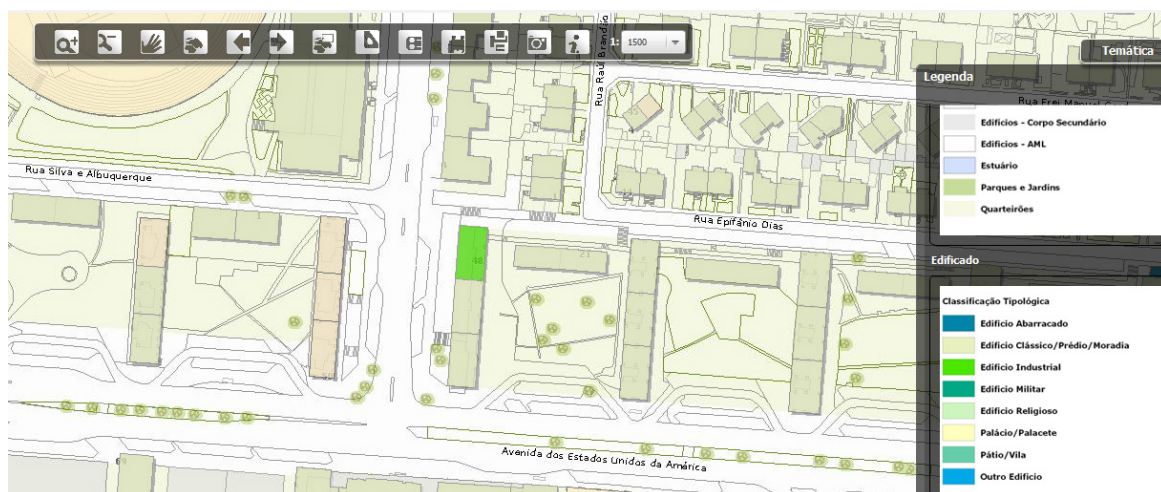


Figura 38 - Classificação tipológica do edificado disponível na plataforma Lisboa Interativa.

A Figura 38 apresenta a cartografia da plataforma Lisboa Interativa™ para a conjunto de edifícios da zona B legendada consoante a classificação tipológica. Está assinalado a verde um polígono que representa um edifício industrial com uma forma idêntica à dos polígonos adjacentes que são edifícios residenciais. Esta situação ilustra a utilidade da classificação tipológica na distinção de edificado residencial e não residencial.

No processo de classificação, é também utilizada a informação censitária do número de edifícios exclusivamente residenciais e principalmente residenciais, e a sua soma limita o número de polígonos classificados como tal. A tabela de atributos dos *layers* do edificado é atualizada à medida que a classificação vai prosseguindo. É importante referir que foram apenas consideradas as subsecções com pelo menos o número de edifícios apontados quer pelos dados censitários quer pela comparação feita com a cartografia da plataforma Lisboa Interativa™. Um trabalho de vectorização em ArcMap para os polígonos dos edifícios em falta não foi feito porque a cartografia era completa para as subsecções dos edifícios de maior interesse. Verificaram-se situações em que as subsecções continham apenas edifícios exclusivamente residenciais e nestes casos a classificação não causou dúvida ao contrário do que aconteceu nos casos em que a subsecção continha um número de polígonos a classificar superior à soma do número de edifícios exclusivamente e principalmente residenciais. Os edifícios principalmente residenciais são aqueles que podem conter andares com escritórios, sedes de empresas e serviços, comércio entre outros tipos de ocupação, e não é correto considerar o seu volume total como sendo residencial. A consulta de fotografia do local, disponibilizada em Google Maps™, permitiu em muitos casos a sua identificação. No entanto, para facilitar o processo de classificação, e também por ser difícil saber ao certo qual a dimensão dessas ocupações, o volume total destes edifícios vai ser considerado na desagregação.

### 3.2.1 – Resultados

Foram analisadas 20 subsecções, incluídas nas freguesias de Nossa Senhora de Fátima e São João de Deus, e 33 subsecções, incluídas nas freguesias de Alvalade e São João de Brito, respetivamente para a região A e região B. As Figuras 39 e 40 ilustram o resultado do processo de seleção e classificação do edificado residencial para a zona A e zona B respetivamente.

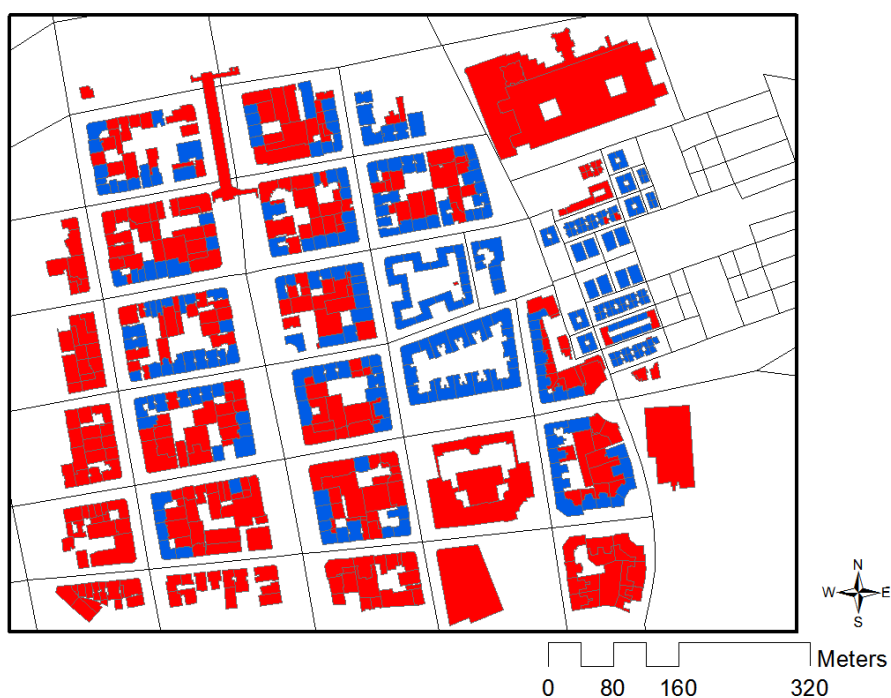


Figura 39 - Edificado residencial (azul) e não residencial (vermelho) para a zona A.

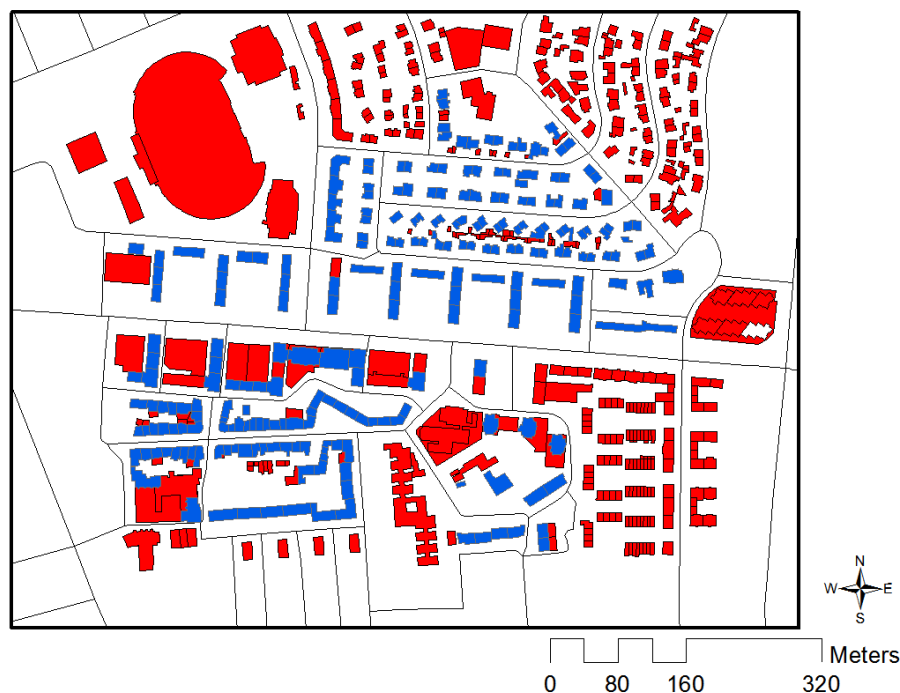


Figura 40 - Edificado residencial (azul) e não residencial (vermelho) para a zona B.

A zona A contém 33 subsecções, 15 na freguesia de Nossa Senhora de Fátima, e 18 na freguesia de S. João de Deus. No fim da classificação das 33 subsecções, 8 apresentam um número de edifícios residenciais inferior ao apontado pelos dados censitários. Contém 304 edifícios residenciais (exclusiva e principalmente). O processo de identificação destes edifícios resultou numa perda de cerca de 3,6% do total dos edifícios residenciais apontados pelos dados censitários, (o que corresponde, em média, a cerca de 0,1% para cada subsecção). Para todas as subsecções consideradas não há nenhum caso em que a diferença seja demasiado grande (O caso, digamos, mais problemático acontece para a subsecção 11062302001, sendo a diferença de 3 edifícios). O processo de classificação termina com 249 e 293 edifícios respetivamente para a zona B e para a zona A. Por sua vez, a zona B contém 20 subsecções, 12 na freguesia de Alvalade e 8 na freguesia S. João de Brito. No fim da classificação destas 20 subsecções, 6 subsecções apresentam um número de edifícios residenciais inferior ao apontado pelos dados censitários. Esta zona contém 266 edifícios considerados residenciais (exclusiva e principalmente). O processo de identificação dos edifícios deste tipo resulta na perda de cerca de 10% do edificado residencial, (o que corresponde em média a cerca de 0,5 % para cada subsecção). Em particular para uma subsecção da freguesia de Alvalade a diferença entre o número apontado pelos dados censitários e o resultado do processo de identificação é de 15 edifícios, sendo este caso o que contribui maioritariamente para esta diferença percentual. A diferença resulta em grande parte, da não consideração de um aglomerado de pequenas moradias que compõe a Vila Afifense, cuja

classificação do edificado residencial suscitou dúvidas mesmo com o cruzamento dos vários tipos de informação disponíveis. A Tabela 2 resume os dados da estimativa.

	<b>Estimativa</b>	<b>Dados censitários</b>	<b>Percentagem não estimada</b>
<b>Zona A</b>	293	304	3.6
<b>Zona B</b>	244	266	8.3

Tabela 2 - Resultados comparativos da classificação do edificado.

Tal como foi proposto por Ural et al. 2011, serão determinados os fatores de ponderação para cada tipo de edifício residencial. Far-se-á a distinção entre edifícios residenciais de apartamentos e moradias. Para isso calcula-se a densidade populacional média das subsecções que contenham apenas edifícios de um só tipo. Tomando a zona B como fonte de informação para este processo escolhem-se todas as subsecções que sejam representativas para o cálculo. Foram consideradas 4 subsecções contendo apenas moradias (Figura 41) e 9 subsecções contendo apenas edifícios de apartamentos (Figura 42). Para cada uma calcula-se a densidade populacional, como a razão entre o total de indivíduos residentes e o volume total do edificado. Assim, as densidades populacionais das moradias e apartamentos são respetivamente, 1,97 habitantes/m<sup>3</sup> e 3,46 habitantes/m<sup>3</sup>.



Figura 41 - Subsecções da zona B que contém apenas moradias



Figura 42 - Subseções da zona B que contêm apenas edifícios de apartamentos.

Nas amostras finais, não existem subseções que contenham edifícios dos dois tipos, por isso a equação de desagregação é, para todos os edifícios, definida como a percentagem de volume ocupada por cada um na subsecção a multiplicar pelo número total de residentes na mesma subsecção. Este cálculo é feito na tabela de atributos do edificado para as duas zonas. Com uma operação de sumário de tabelas é calculado o volume total do edificado para cada subsecção, depois esse campo é agregado à tabela principal, e é criado um novo campo para receber os valores da população por edifícios. Os resultados para as duas zonas são apresentados nas Figuras 43 e 44.

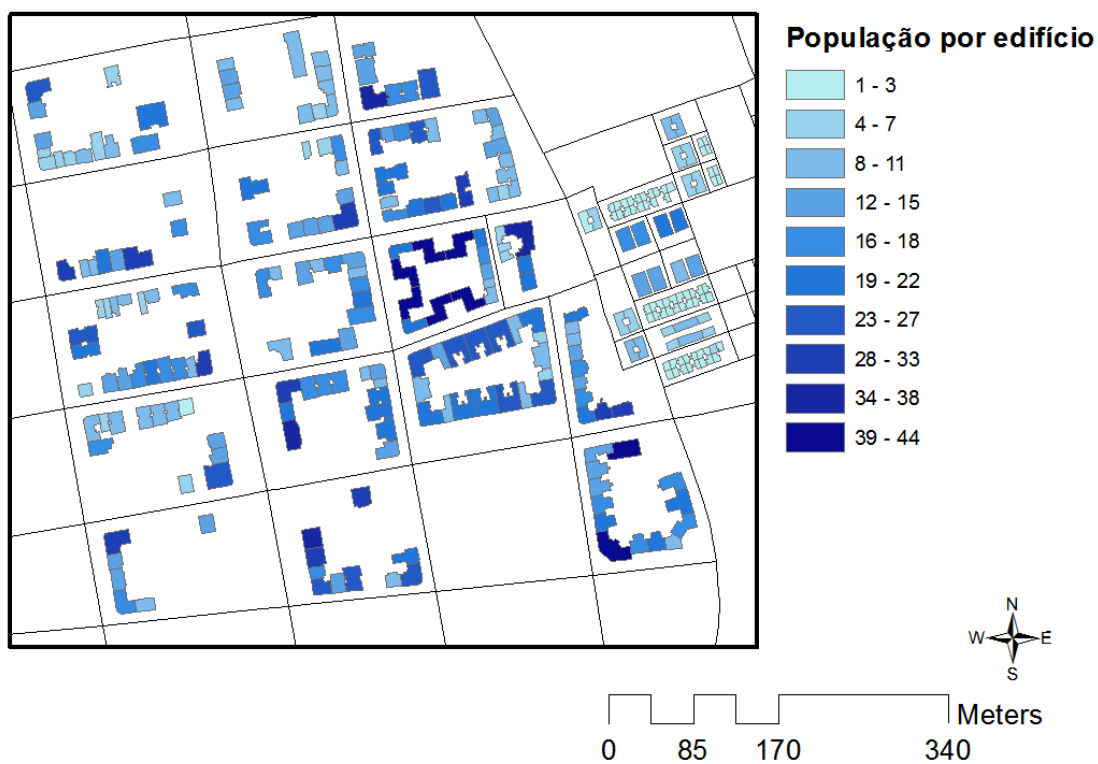


Figura 43 - Mapa da distribuição da população por edifício para a zona A.

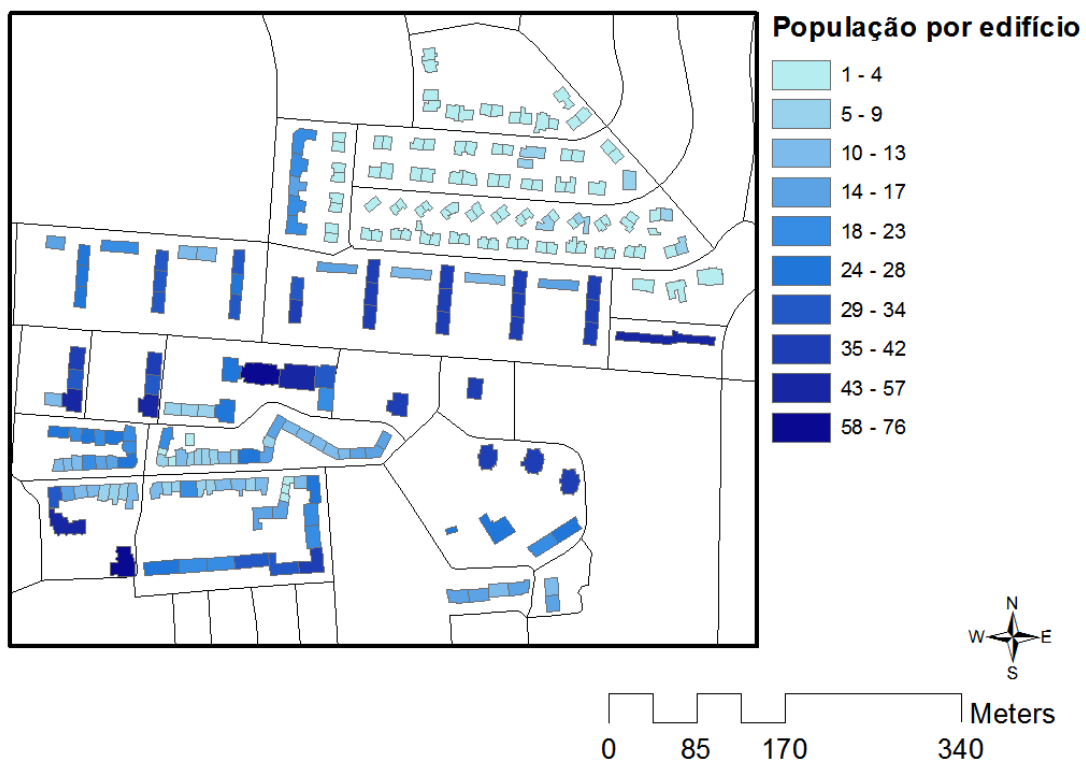


Figura 44 - Mapa da distribuição da população por edifício para a zona A.



### 3.2.2 Estimativa do consumo de energia elétrica

Terminada a estimativa da distribuição da população por edifício pode estimar-se o consumo de energia elétrica por edifício. Para tal, é necessário estimar o consumo individual. Esta estimativa será feita recorrendo a uma normalização por pessoa do consumo total, com base no diagrama de carga para um ano típico em Portugal continental. Considerando que, para um determinado intervalo de tempo, o consumo de cada uma das zonas, e por sua vez de um edifício, será igual à razão entre o consumo total e o número de total de habitantes do país (segundo o último levantamento censitário, é 10562178 habitantes), multiplicado depois pelo número de residentes da zona, ou do edifício considerado, dependendo do tipo de análise que procuramos fazer, como se mostra nas equações 6,7, e 8.

$$\text{Consumo per capita} = \frac{\text{Consumo total}}{N^{\circ}\text{Habitantes}} \quad (6)$$

$$\text{Consumo por zona} = \text{Consumo per capita} \times N^{\circ}\text{ Residentes da Zona} \quad (7)$$

$$\text{Consumo por edifício} = \text{Consumo per capita} \times N^{\circ}\text{ Residentes no edifício} \quad (8)$$

Os dados de consumo utilizados referem-se ao ano de 2011 e foram obtidos através do sítio da REN (REN, 2011) com valores de consumo de potência, medidos a cada 15 minutos, para todo os dias do ano. É de referir que este diagrama de carga engloba todos os tipos de consumo, e uma vez que se pretende fazer a comparação da produção fotovoltaica com o consumo doméstico, os diagramas anuais apresentados seguidamente (Figuras 45 e 46) terão duas curvas de consumo: Uma, na qual os valores horários utilizados foram aqueles que resultam diretamente do cálculo da média dos quatro quartos de hora, e outra, na qual cada valor horário considerado será a diferença entre o próprio valor e o valor mínimo das 24 horas precedentes de forma a excluir o consumo em *Base Load*. Este raciocínio resulta da consideração de que o consumo doméstico em *Base Load* não será satisfeito pelos sistemas fotovoltaicos, uma vez que, tipicamente, é satisfeito por centrais que possam fornecer energia a uma taxa constante, como por exemplo centrais térmicas de baixo custo (uma central a carvão ou a biomassa). O consumo por edifício é apresentado na Figura 47.

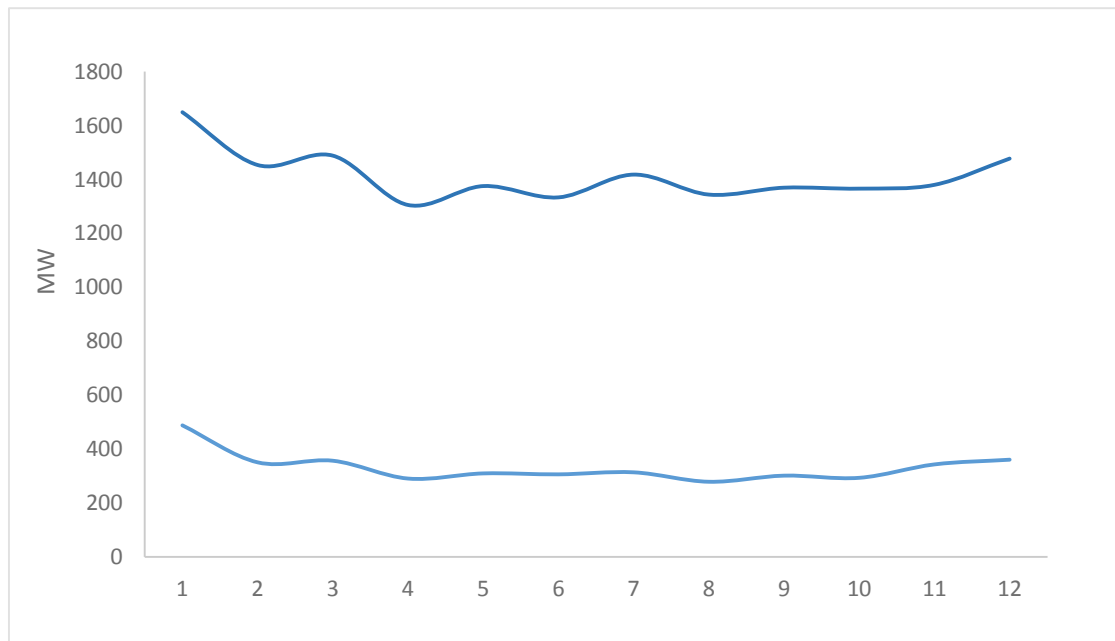


Figura 45 - Diagrama de carga representativo do consumo mensal ao longo do ano, para a zona A. A azul-escuro o consumo total, a azul claro o consumo sem *baseload*.

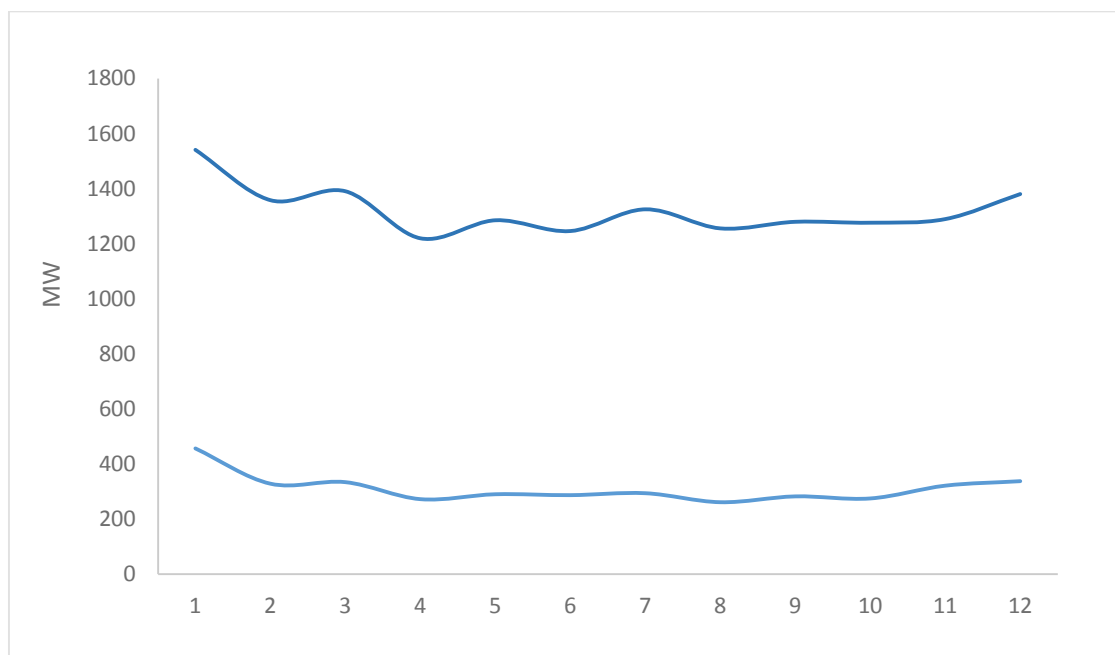


Figura 46 - Diagrama de carga representativo do consumo mensal ao longo do ano, para a zona B. A azul-escuro o consumo total, a azul claro o consumo sem *baseload*.

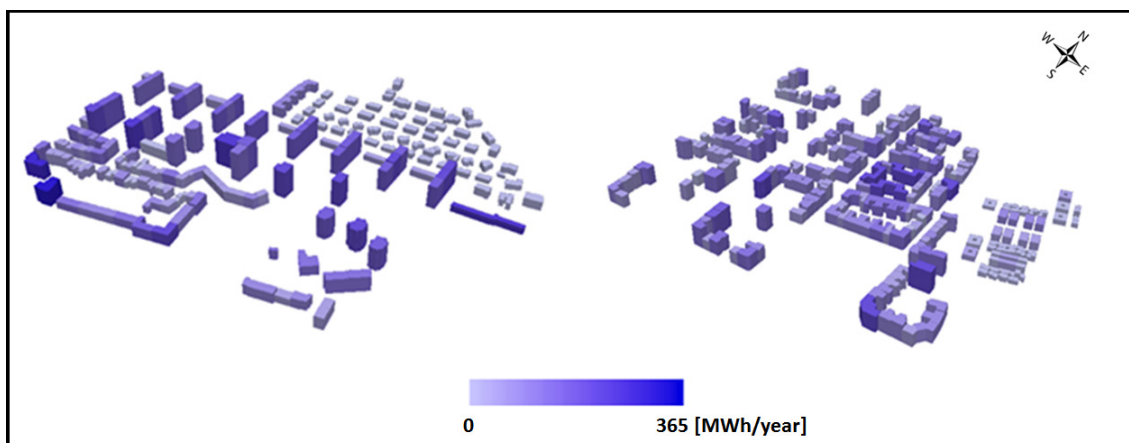


Figura 47 - Consumo anual total por edifício. Zona A à direita e zona B à esquerda.

### 3.3 – Estimativa do potencial solar

#### 3.3.1 Descrição do funcionamento do programa SOL

O programa SOL é um algoritmo criado em ambiente Matlab para a avaliação do potencial solar em qualquer ponto da paisagem urbana, independentemente de a sua localização ser no telhado, chão ou fachada (Redweik et al. 2013). A metodologia parte de uma nuvem de pontos 3D obtida via LiDAR, que é reamostrada para uma grelha *raster* de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  (Figura 48). Pixels com declives superiores a  $72^\circ$  são convertidos para *pixels* com declives de  $90^\circ$ , uma vez que podem corresponder a superfícies verticais em ambiente urbano. É utilizada a base de dados do ano meteorológico típico associada ao programa SOLTERM (Aguiar 1998), que inclui vários médios horários para a radiação direta e difusa medida na horizontal, calculada ao longo de um período de 30 anos a partir de observações climáticas. Para as superfícies inclinadas é seguida uma abordagem geométrica com recurso a fórmulas astronómicas. Em alternativa o modelo poderia seguir a abordagem proposta pelo modelo empírico proposto Kumar et al. 1997. Um algoritmo de sombra é aplicado a cada ponto do DSM, incluindo as árvores, para cada instante, que simula a sombra ao longo da linha oposta à direção do sol. Sempre que a linha se interrompe, isto é, quando uma célula do DSM nessa linha tem uma cota inferior à sombra, a mesma é considerada em sombra e recebe o atributo 0, de forma a criar um mapa binário. Quanto à radiação difusa, este modelo não considera a contribuição da luz refletida. Um conceito importante a ter em conta para o cálculo desta quantidade é o *sky view factor* (SVF). Ao longo de uma fachada o SVF varia bastante, sendo por exemplo maior em pontos mais elevados. Varia com o espaço mas não com o tempo e por isso é independente da posição do sol no céu, dependendo sim, das relações espaciais entre os vários elementos urbanos. É aplicado o método de *sky view factor* de Ratti &

Richens 2004 incluindo uma disposição não uniforme de fontes de luz e que representam a componente circumsolar difusa. O mapa de radiação difusa para cada intervalo de tempo é calculado multiplicando o mapa SVF pela radiação difusa horizontal a céu aberto para cada intervalo de tempo específico.

Para as fachadas, o SVF é estimado tendo em conta que este será no máximo 0,5 (Considera-se o SVF um fator que varia entre 0 e 1), uma vez que, independentemente da orientação, qualquer fachada verá no máximo metade do céu no hemisfério. Seguidamente a radiação difusa em cada ponto das fachadas é calculada da mesma forma que para o chão e telhados. O mapa de radiação global vem obviamente preenchido com a soma das duas componentes computadas previamente. Os pontos de fachadas correspondem a hiper-pontos, com as mesmas coordenadas XY e com coordenadas Z diferentes. É importante referir que as fachadas não se encontram representadas por pontos nos dados LiDAR, e foram posteriormente construídas à mesma resolução espacial e temporal, com hiper - pontos criados a partir da base e do topo do edifício. O conjunto de informação usado neste estudo é um excerto de um levantamento LiDAR DSM de 2006, fornecido pela LOGICA. A elevação e a intensidade do primeiro e último feixe, que retorna de um instrumento LiDAR TopoSys II 83 kHz, a partir de um helicóptero, são gravadas para cada feixe, com uma densidade média de medições de 20 pontos por metro quadrado (Figura 48).

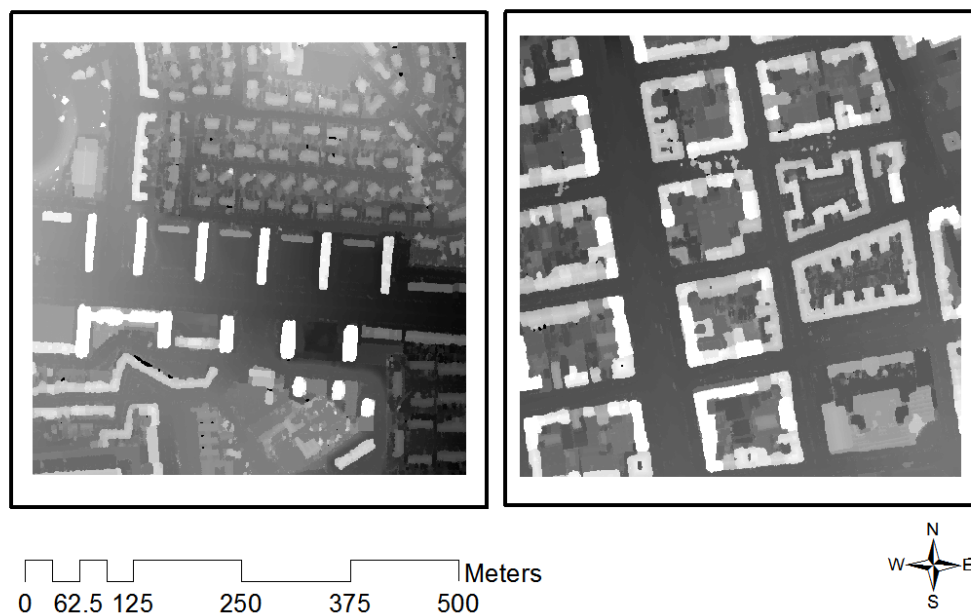


Figura 48 - Grelhas LiDAR. (Zona A à direita, Zona B à esquerda).

### 3.3.2 Processamento dos dados

O *workflow* da Figura 49 esquematiza as operações SIG aplicadas aos resultados do programa SOL.

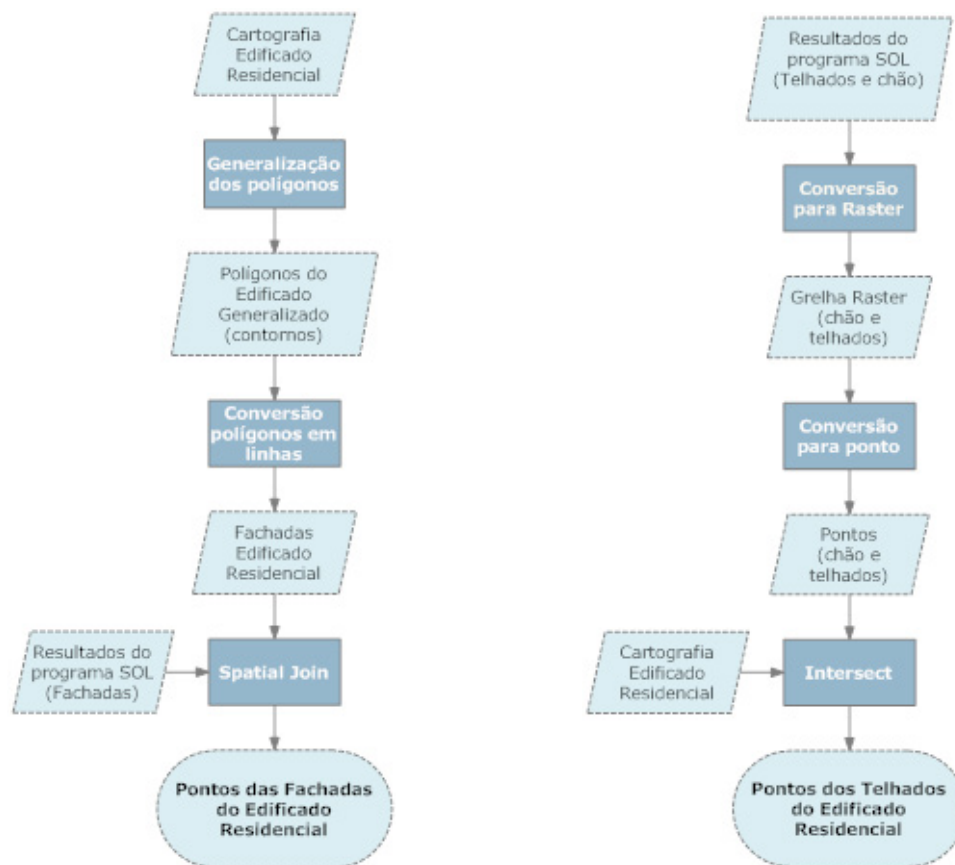


Figura 49 - Esquema *workflow* do processamento dos resultados do programa SOL, em ArcMap™. Para as fachadas (à esquerda) e para os telhados (à direita).

Para as fachadas, resultam tabelas horárias com 257736 entradas (híper-pontos) para a zona A e 161037 entradas para a zona B, onde constam os valores de radiação direta, difusa e global (Figura 50). A informação correspondente à radiação do chão e telhados fica disponível em grelhas ASCII, também horárias (Figura 51). Para telhados e chão, após a conversão da grelha em pontos, resultam para a zona A, 228178 pontos, e para a zona B, 230141 pontos.

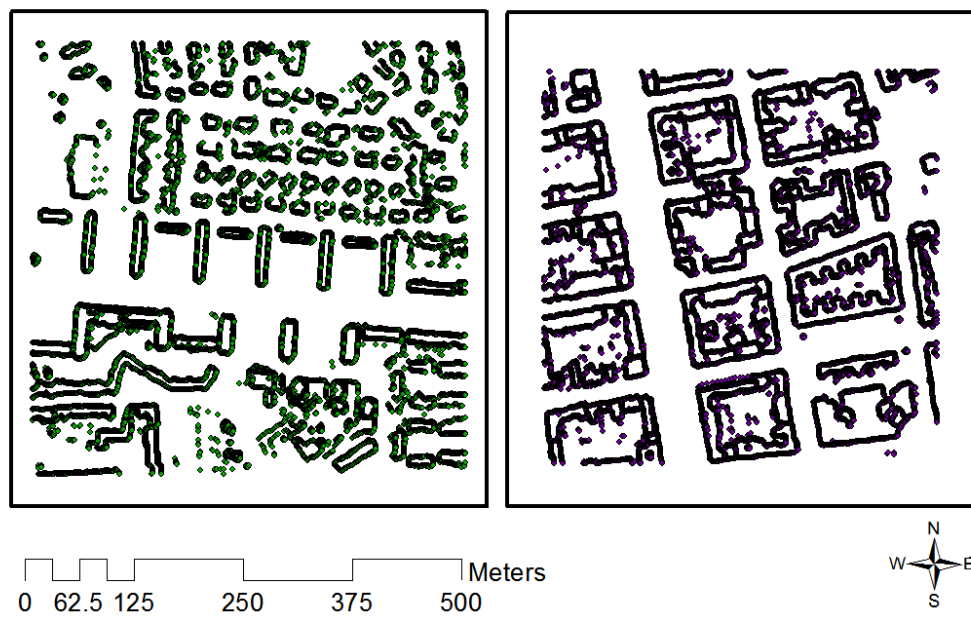


Figura 50 - Representação dos *layers* de pontos das fachadas, num intervalo de tempo específico, para as duas zonas (Zona A à direita, Zona B à esquerda).

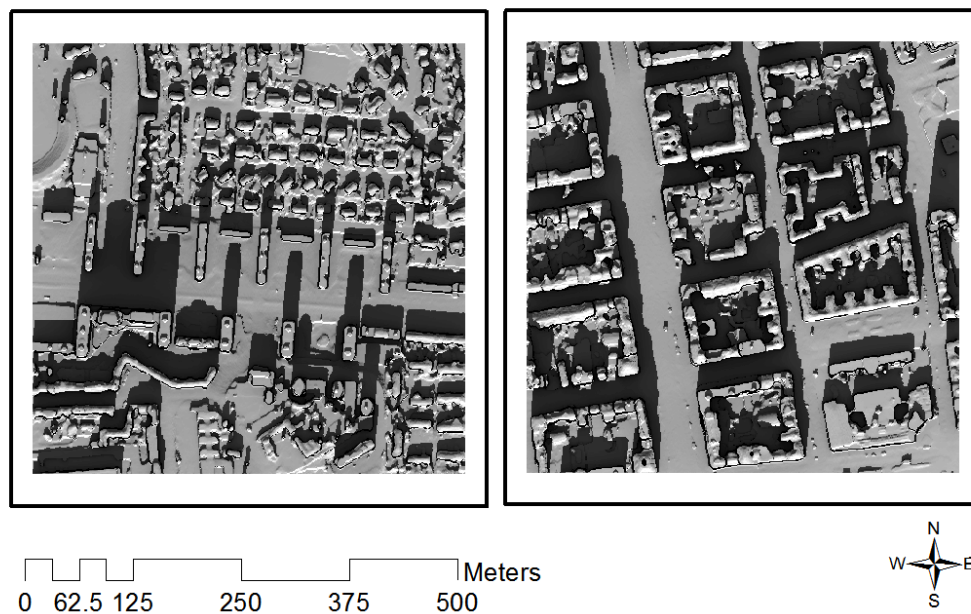


Figura 51- Representação dos *rasters* de telhados e chão, num intervalo de tempo específico, para as duas zonas (Zona A à esquerda, Zona B à direita).

Em ArcMap, esta informação é associada com rigor espacial (através de uma operação de análise de proximidade) aos polígonos do edificado residencial. Estes polígonos são convertidos em linhas para individualizar as fachadas (Figura 52).

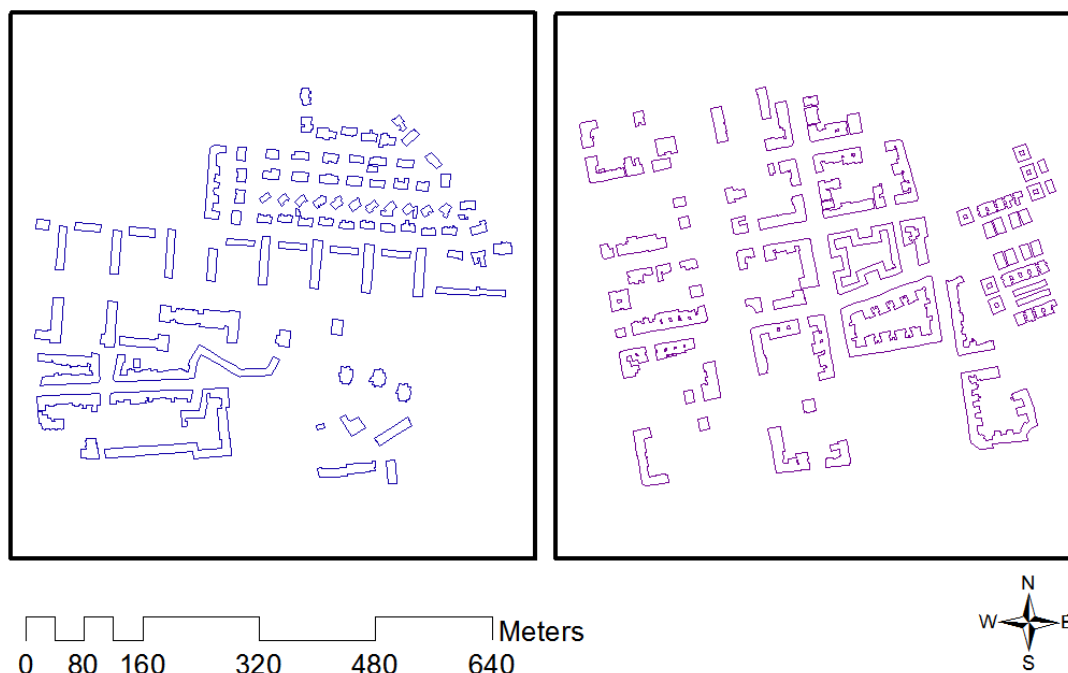


Figura 52 - Representação da conversão dos polígonos em linhas (fachadas) para as duas zonas (Zona A à direita, Zona B à esquerda).

As operações de análise espacial foram feitas de forma diferente para pontos das fachadas e pontos dos telhados. Pretende-se apenas considerar os pontos que possam pertencer às superfícies de interesse. São considerados como pontos de fachadas todos aqueles que estejam a uma distância inferior a 2.5 metros (Figura 53). Foi um valor escolhido de forma mais ou menos arbitrária, mas é razoável tendo em conta que a resolução de cada ponto é de um metro quadrado. O número de pontos para a zona B reduz-se de 161037 para 103915, e para a zona A, de 257736 pontos para 156018 pontos. Tentou comprovar-se a coerência do raio de pesquisa escolhido na visualização das representações 3D dos resultados. De facto, a comparação dos pontos que desaparecem com o conjunto total de pontos permite concluir que se omitem apenas pontos que claramente não pertencem a edifícios, e portanto a representação do edificado não se altera, pelo que se pode afirmar que o raio escolhido é razoável de acordo com a consideração que se pretende. Os pontos

dos telhados são todos aqueles que interseam os polígonos da cartografia do edificado (Figura 54). Da interseção resultam 46807 pontos para a zona A e 32829 para a zona B.



Figura 53 - Representação dos pontos de fachadas, resultantes da operação spatial join, para as duas zonas (Zona A à esquerda, Zona B à direita).



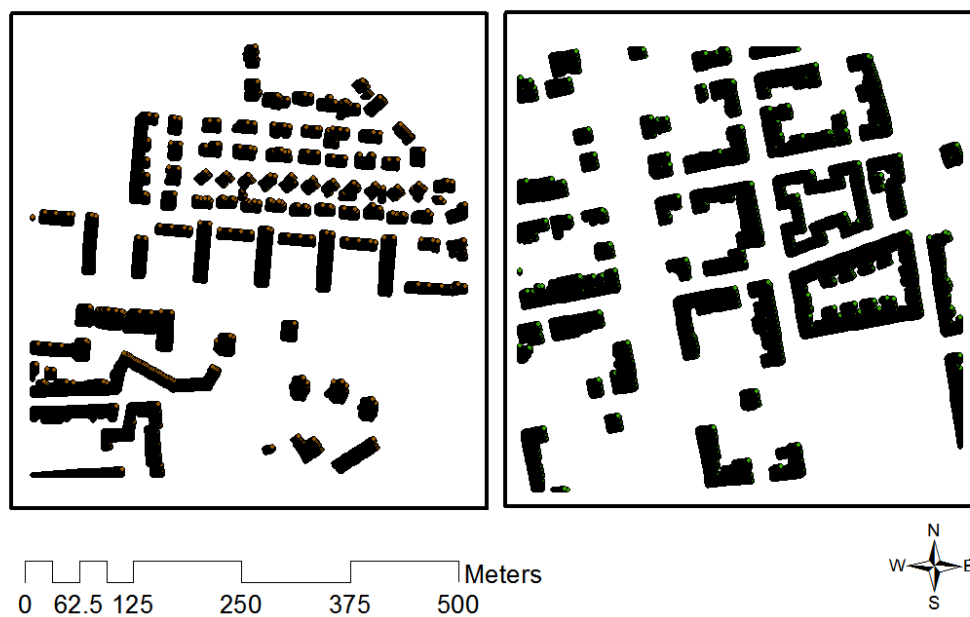


Figura 54 - Representação dos pontos dos telhados, resultantes da operação Intersect, para as duas zonas (Zona A à esquerda, Zona B à direita).

Nesta fase, a informação relativa à radiação, para telhados e fachadas, é utilizada nos cálculos de produção fotovoltaica. Este processamento pode ser feito para qualquer intervalo temporal, quer seja para uma análise diária, mensal, sazonal ou anual.

Os dados resultantes do programa SOL podem ser representados tridimensionalmente, mostrando os valores de radiação nas fachadas, telhados e chão para vários intervalos de tempo na plataforma ArcScene™ (ESRI, 2012), como se mostra no capítulo seguinte.

## 4 – Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se, para as duas zonas, os resultados e discussão da comparação da produção fotovoltaica com os diagramas de carga para vários intervalos temporais. A base mais relevante para dimensionar sistemas fotovoltaicos é a sua produção energética anual, que é também a melhor medida para monitorizar o seu desempenho a longo prazo. As análises dos resultados foram por isso feitas para todos os meses ao longo do ano, e também para os dias que assinalam mudanças de estação e, portanto, uma alteração mais característica da variabilidade do

recurso nesses períodos. Os resultados do programa SOL correspondentes a estes períodos temporais foram processados em ArcMap 10™. A produção fotovoltaica foi calculada assumindo a eficiência e fatores de produção mencionados na secção de metodologia do capítulo 1. Como foi apontado no capítulo 2, o cálculo do potencial fotovoltaico pode seguir várias abordagens. Šúri et al. 2007 consideram a este respeito que o potencial fotovoltaico pode ser calculado através da equação 10.

$$E = P_k PRG \quad (10)$$

Onde  $E$  representa a energia produzida anualmente,  $P_k$  representa a potência de pico unitária (considerada 1 kWp),  $PR$  representa a taxa de desempenho e  $G$  representa a radiação global anual no plano do módulo fotovoltaico. O fator  $P_k$  é determinante para dimensionar um sistema fotovoltaico e caracteriza a potência nominal de saída dos módulos fotovoltaicos em condições padrão de teste, quando a radiação no plano dos módulos é 1000 W/m<sup>2</sup> e a sua temperatura de funcionamento é 25 °C. A utilização desta medida evita a necessidade de saber a eficiência da conversão fotovoltaica ou a área do módulo. O fator  $PR$  seria 1 para um sistema a funcionar constantemente nas condições padrão, o que não acontece na prática devido a vários fatores, nomeadamente a variação da temperatura de funcionamento, sendo assim assumido o valor de 0,75 para a taxa de produção. No estudo aqui apresentado não foi utilizada a potência de pico, em vez, foi considerada uma eficiência típica dos módulos de 15%, uma vez que não se pretende falar estritamente de produção fotovoltaica em condições padrão. A eficiência típica do sistema que engloba vários fatores de produção foi escolhida em coerência com os valores apontados por vários autores, à semelhança da apontada por Šúri et al. 2007, portanto, 75%. Esta abordagem é uma aproximação um pouco grosseira e pode ser melhorada se se considerar a temperatura de funcionamento dos módulos a partir da temperatura ambiente local e dos detalhes técnicos de operação, como é apontado por Jakubiec et al. 2013.

A figura 55 mostra o histograma do potencial fotovoltaico anual da zona A (linhas vermelhas) e da zona B (linhas pretas), em ambas para telhados (linhas sólidas) e fachadas (linhas a tracejado). Os resultados confirmam que os telhados apresentam níveis de radiação muito mais elevados, de 1000 a 2000 kWh/m<sup>2</sup>/ano, dependendo da orientação e inclinação. Por outro lado, as fachadas, produzem tipicamente apenas no intervalo de 100 – 1000 kWh/m<sup>2</sup>/ano, dependendo da orientação (verificam-se maiores níveis de radiação anual nas fachadas orientadas a sul) e também dos efeitos de sombreamento provocados por elementos urbanos na sua vizinhança. É importante referir que as características dos edifícios da zona A, com pátios interiores e topografia indentada, fazem com que a zona apresente maior área de fachada e consequentemente mais área irradiada, ainda que seja mais baixa a densidade média da radiação incidente.

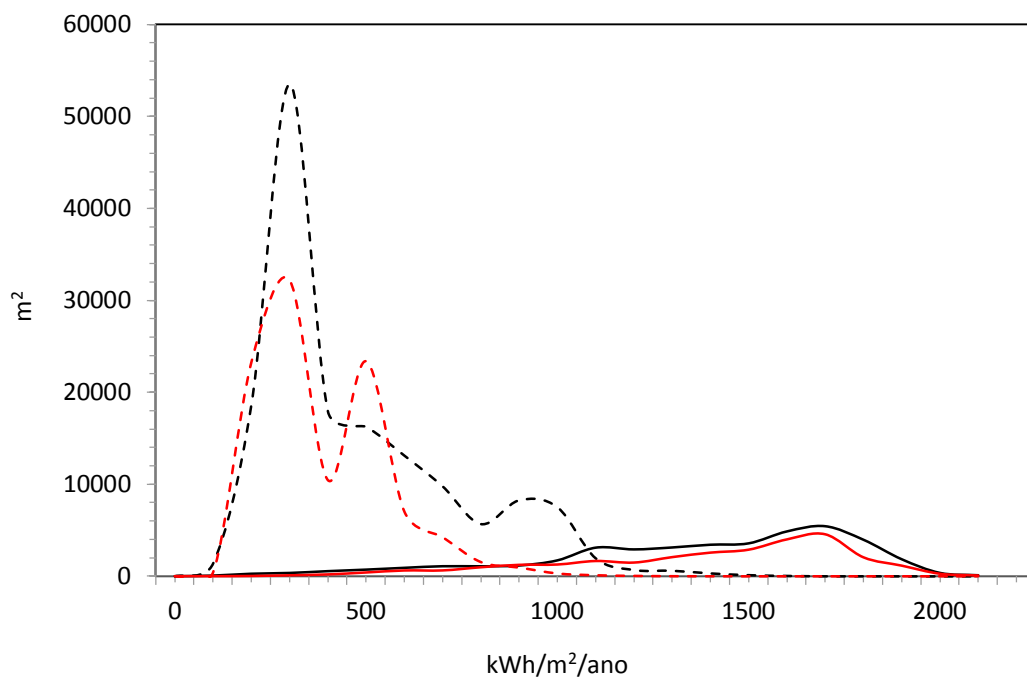


Figura 55 - Histograma do potencial fotovoltaico para a zona A (a vermelho) e para a zona B (a preto).

As linhas a tracejado representam as fachadas e as linhas sólidas representam os telhados.

A Figura 56 representa um mapa de radiação anual, para as duas zonas de estudo. A observação mais evidente aponta para o fato de os telhados e chão receberem radiação em níveis claramente superiores às fachadas, tanto na zona B, com edifícios mais altos e geralmente menos obstruídos, como na zona A, que é uma área mais densa em edificado, tipicamente de 3 andares. De uma maneira geral, pode, portanto, concluir-se que os efeitos de sombreamento mútuo têm apenas um efeito de segunda ordem no desempenho fotovoltaico das fachadas quando comparada com aquela de instalações com inclinação e orientação ótimas.

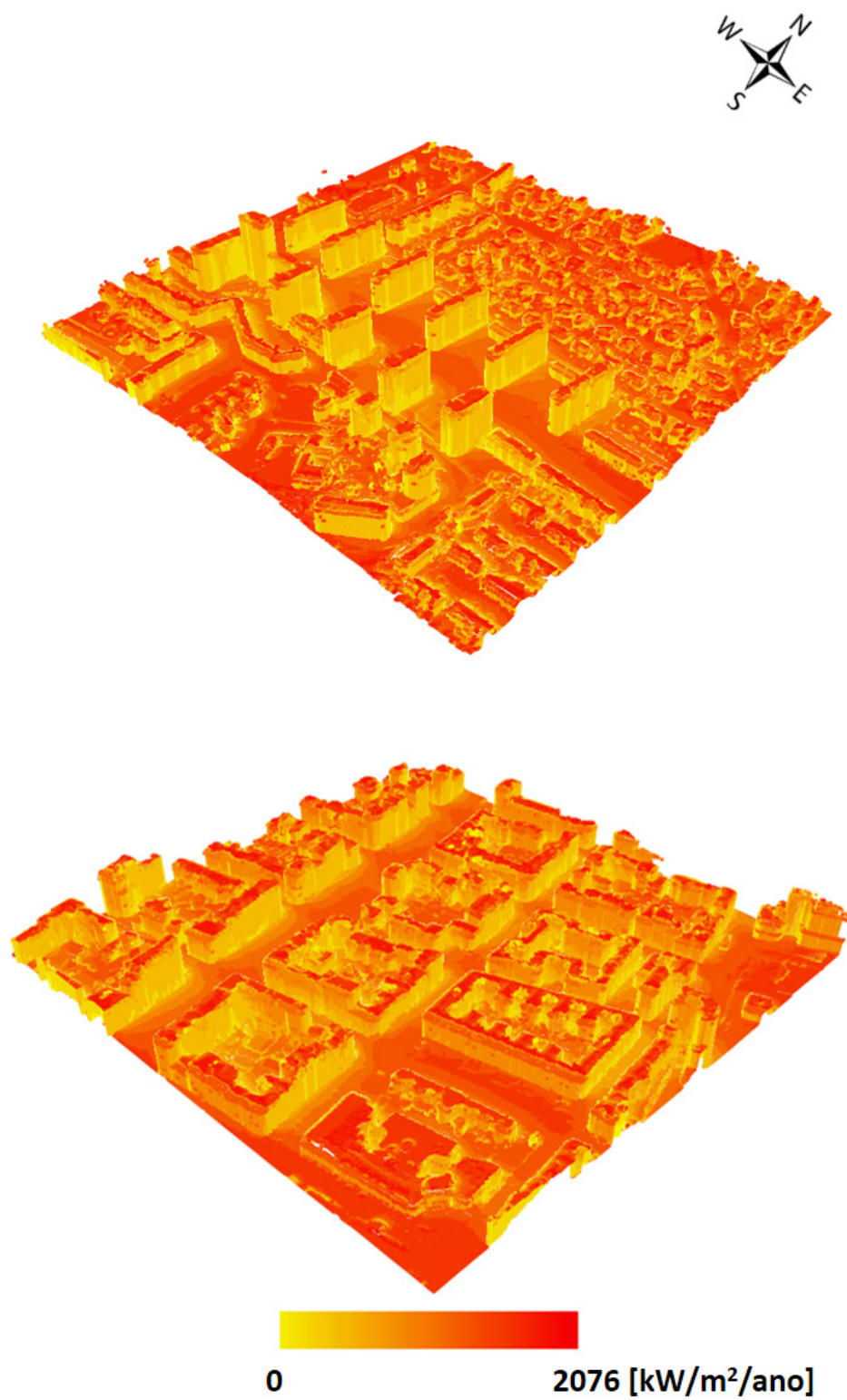


Figura 56 - Radiação global anual para as duas zonas. Zona A em baixo, zona B em cima.

A figura 56 mostra também que as fachadas orientadas a sul apresentam maiores rendimentos anuais que as fachadas a este ou oeste para a ambas as zonas (as fachadas a oeste não são visíveis desta perspetiva), como é facilmente observável nos quarteirões centrais da zona A (em baixo). É de notar a variação do potencial fotovoltaico nas fachadas a este, como é possível de observar nos edifícios mais altos da zona B (a cima), que apresentam um certo grau de sombreamento mútuo nos primeiros andares.

A figura 57 mostra para as duas zonas, o potencial fotovoltaico mensal acumulado nos telhados (coluna a vermelho) e fachadas (diferentes níveis de laranja/amarelo, de acordo com quatro classes diferentes: acima de 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano, entre 700 e 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano, entre 500 e 700 kWh/m<sup>2</sup>/ano e abaixo de 500 kWh/m<sup>2</sup>/ano, respetivamente), *versus* o consumo local de energia elétrica. A linha sólida descreve o consumo sem a *base load* enquanto a linha a tracejado descreve o consumo para a carga total.

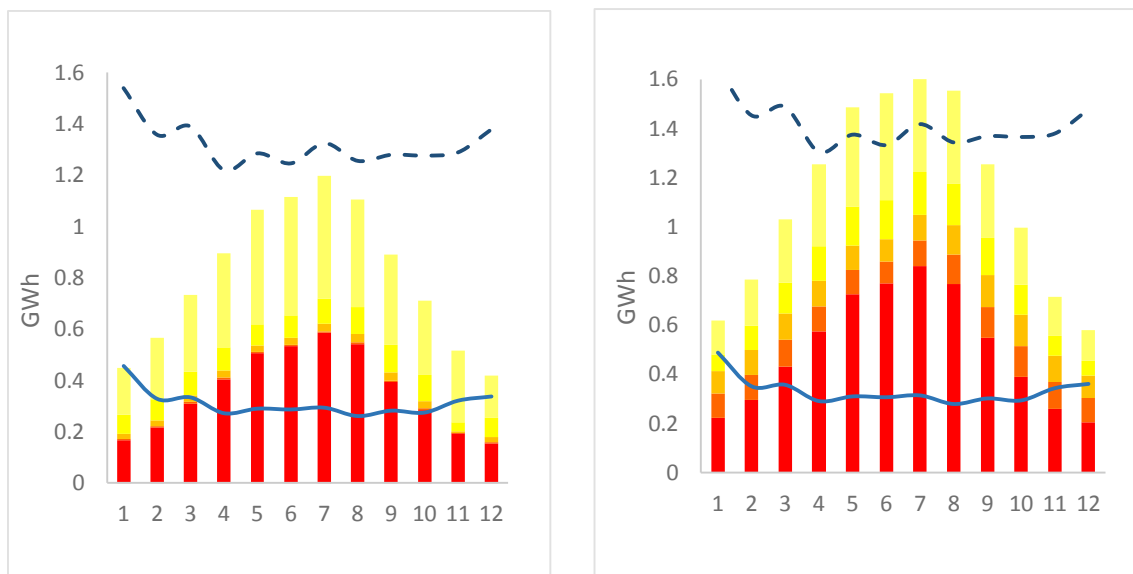


Figura 57- Radiação solar mensal (telhados: coluna vermelha; fachadas: laranja/amarelo de acordo com 4 classes diferentes: acima de 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano, entre 700 e 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano, entre 500 e 700 kWh/m<sup>2</sup>/ano e abaixo de 500 kWh/m<sup>2</sup>/ano, respetivamente, e consumo de energia elétrica; linha a tracejado: consumo total mensal, e linha sólida: consumo mensal sem *baseload*) para a zona B à esquerda e zona A à direita.

Os resultados mostram que o potencial é mais favorável na zona A do que na zona B. Em termos anuais, ambas as zonas apresentam potenciais fotovoltaicos para os telhados que excedem o consumo local sem *baseload* e podem contribuir para cerca de 26 % e 36 %, respetivamente para as zonas B e A. Se acrescentarmos o potencial das fachadas esta percentagem aumenta para 60 % e 79 % respetivamente.

Durante os meses de Verão, o potencial total dos telhados excede o consumo sem *baseload* para as duas áreas. Se o potencial total das fachadas for considerado, o potencial fotovoltaico dos edifícios atinge a mesma ordem de grandeza do consumo total; para a zona A, este limiar é mesmo ultrapassado em 4 dos meses do Verão.

Durante os meses de Inverno, o consumo aumenta ligeiramente, uma vez que, os dias se tornam mais curtos e mais frios, e consequentemente requerem mais gastos em iluminação e em aquecimento, e a radiação solar decresce significativamente. O potencial total dos telhados não é suficiente para cobrir as necessidades energéticas durante 5 meses do ano para a zona B e quatro meses do ano para a zona A, no entanto, estas necessidades seriam satisfeitas se o potencial total de fachadas e telhados fosse utilizado. Em geral, os resultados salientam a relevância do papel desempenhado pela integração da energia fotovoltaica em edifícios nos sistemas de energia elétrica em ambientes urbanos. Está claro que, no contexto económico atual, ou previsto a curto ou médio prazo, da indústria fotovoltaica, o preço desta tecnologia é elevado, não é razoável esperar que todas as fachadas possam ser cobertas com módulos fotovoltaicos. De facto, a classificação das fachadas de acordo com a produção anual (as diferentes escalas representadas na figura 57) podem ser interpretadas como classes diferentes em termos de tempo de retorno do investimento, portanto, a classe mais laranja (acima de 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano) são investimentos rentáveis em sistemas fotovoltaicos, mesmo nas atuais condições do mercado enquanto a classe amarela clara (abaixo de 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano) só seriam interessantes como investimento se os custos descessem significativamente. No contexto atual do mercado fotovoltaico, os resultados apresentados na figura 57 mostram que, para a zona A, o consumo sem *baseload* pode ser satisfeito através das fachada e telhados mais rentáveis, para 10 meses do ano. Para a zona B, onde a maioria das fachadas tem um rendimento anual mais modesto (abaixo dos 500 kWh/m<sup>2</sup>/ano) a contribuição das fachadas mais rentáveis em termos de investimento seria marginal, reduzindo o défice entre 4 a 5 meses.

É de notar que o consumo sem *baseload* é cerca de um quarto do consumo total, que é muito próximo da percentagem do consumo residencial estimado (28% do consumo total para o distrito de Lisboa em 2012 (PORDATA, 2013). Assim, a linha sólida de consumo pode na verdade corresponder ao consumo nos edifícios residenciais das zonas de estudo. Do ponto de vista da análise de sistemas de energia, podemos ter várias interpretações. Do ponto de vista do consumo sem *baseload*, os resultados sugerem que, no fornecimento de energia elétrica para uma cidade, os sistemas fotovoltaicos em telhados e/ou fachadas podem desempenhar um papel importante, particularmente nos meses de Verão, mas são necessárias alternativas para a produção em *baseload*. Por outro lado, se essa mesma linha na figura 57 for considerada como o consumo nos edifícios residenciais, podemos concluir que os sistemas fotovoltaicos nos telhados e fachadas podem de facto ser de extrema relevância para se atingir a meta de edifícios *nearly net zero energy*

em ambientes urbanos. As fachadas apresentam uma contribuição significativa às escalas temporais mensais ou anuais, isto deve-se ao facto de representarem uma grande porção de área disponível das superfícies verticais, nas cidades atuais. Contudo, as fachadas apresentam também a mais-valia da produção *off-peak*, isto é, quando o recurso solar é menos abundante, como se pode comprovar pela produção crescente nos meses de Inverno quando a altura solar é menor e nas primeira e últimas horas de sol do dia, para as fachadas orientadas a este e oeste.

As figs. 58 e 59 mostram a radiação global solar ao meio dia num dia de Inverno e às nove horas de um dia de Verão e fornecem informações para uma análise do impacto da inclinação e orientação não ótimas das fachadas e, consequentemente, o seu pico de produção inverso, ou seja, quando o consumo de energia é baixo. Pode observar-se para as duas zonas que, ao meio dia de um dia de Inverno as fachadas voltadas a sul recebem mais radiação que os telhados (ou o chão) e que as fachadas a este (que não são vistas dada a perspetiva) e as fachadas a oeste recebem menos radiação. Nas primeiras horas de sol de um dia de Verão para as duas zonas, pode observar-se que o potencial solar é muito mais elevado do que o pico solar de Inverno, mesmo algumas horas mais cedo, e que os telhados (e chão) têm muito maior densidade de radiação que as fachadas, independentemente das suas orientações.

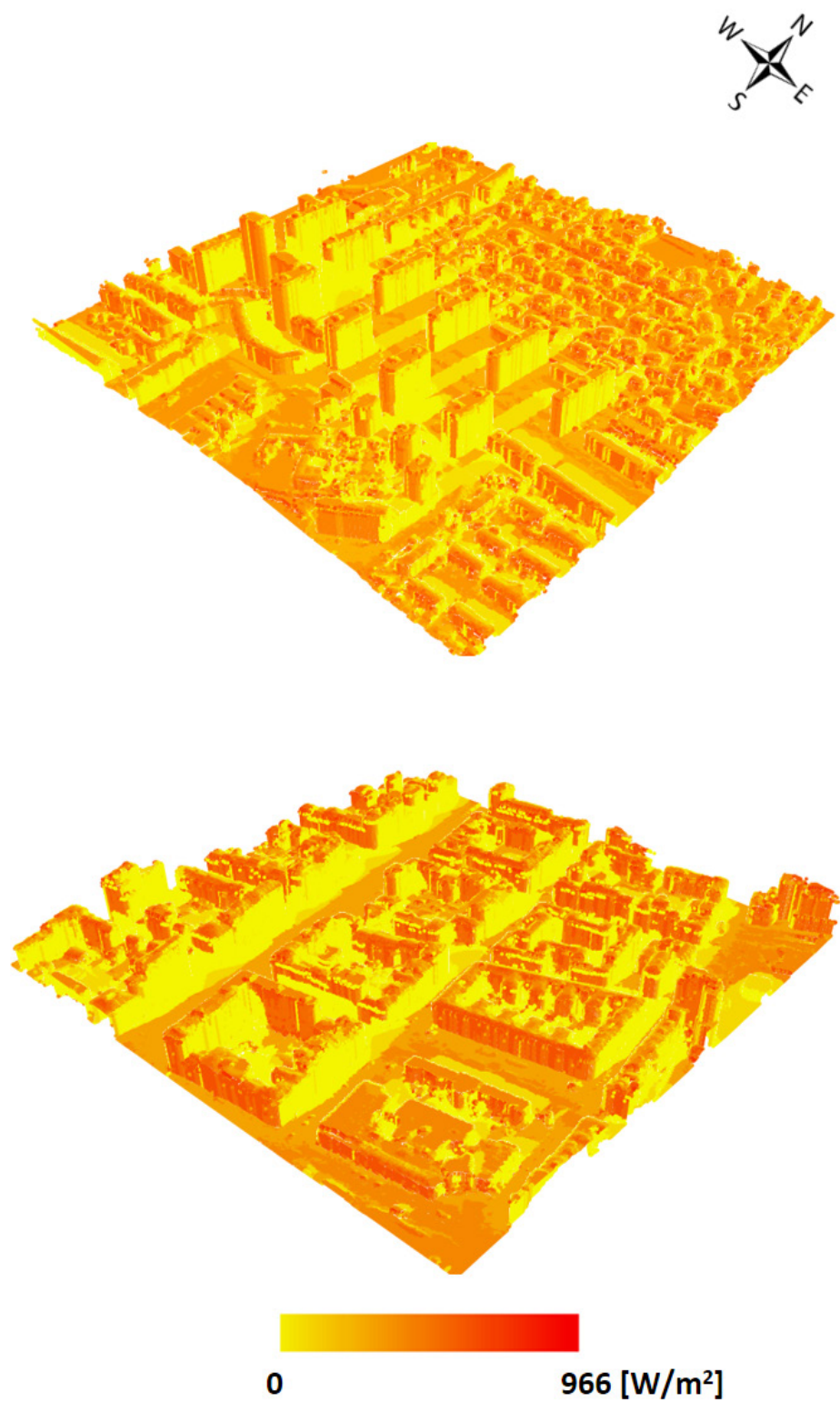


Figura 58 - Radiação solar para a zona B em cima e zona A em baixo, para as 12 horas do dia 21 de Dezembro.



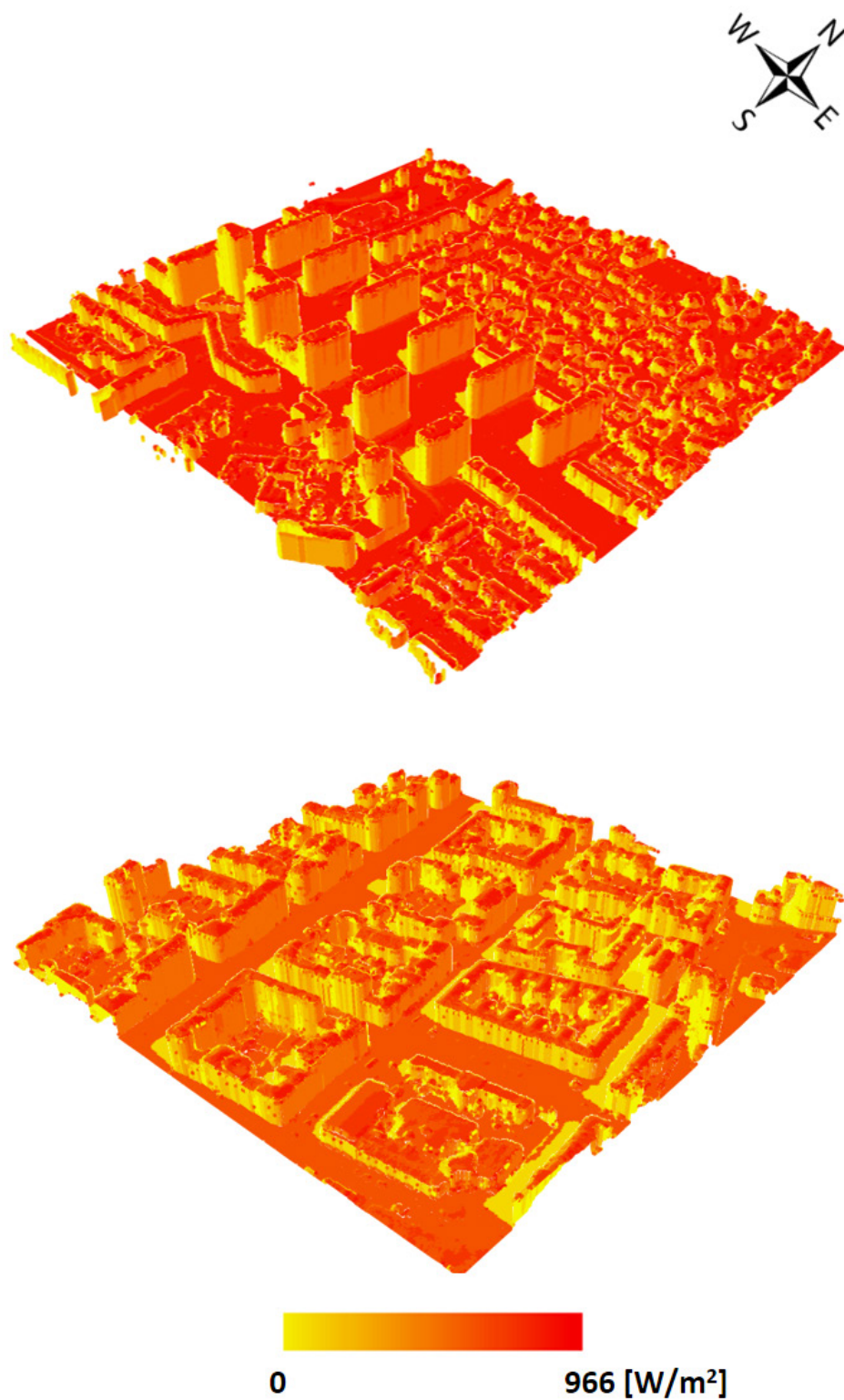


Figura 59 - Radiação solar para a zona B em cima e zona A em baixo, para as 9 horas do dia 21 de Junho.

Para o dia de Inverno (Figura 60), como já foi discutido anteriormente, devido aos níveis baixos de radiação solar e menos horas de sol, o fornecimento total de energia fotovoltaica é significativamente inferior que o consumo local para ambas as zonas. O pico de potência fotovoltaica consegue garantir apenas meio-dia de consumo se o potencial das fachadas for considerado. A mais-valia do fornecimento *off-peak* não é significativa uma vez que as não orientadas a sul não se encontram particularmente expostas durante os dias de Inverno. De facto, o pico de produção das fachadas acontece ao mesmo tempo que o pico de produção dos telhados, que não coincide com o pico de consumo matinal ou noturno, tipicamente associado aos gastos em iluminação.

Tipicamente, para um dia de Verão (Figura 60), verifica-se que o potencial de pico dos telhados ultrapassa o consumo ao meio dia; é pouco notório na zona B mas particularmente evidente na zona A. O potencial de pico das fachadas ultrapassa o consumo matinal nas duas zonas; mais uma vez este efeito é mais evidente na zona A.

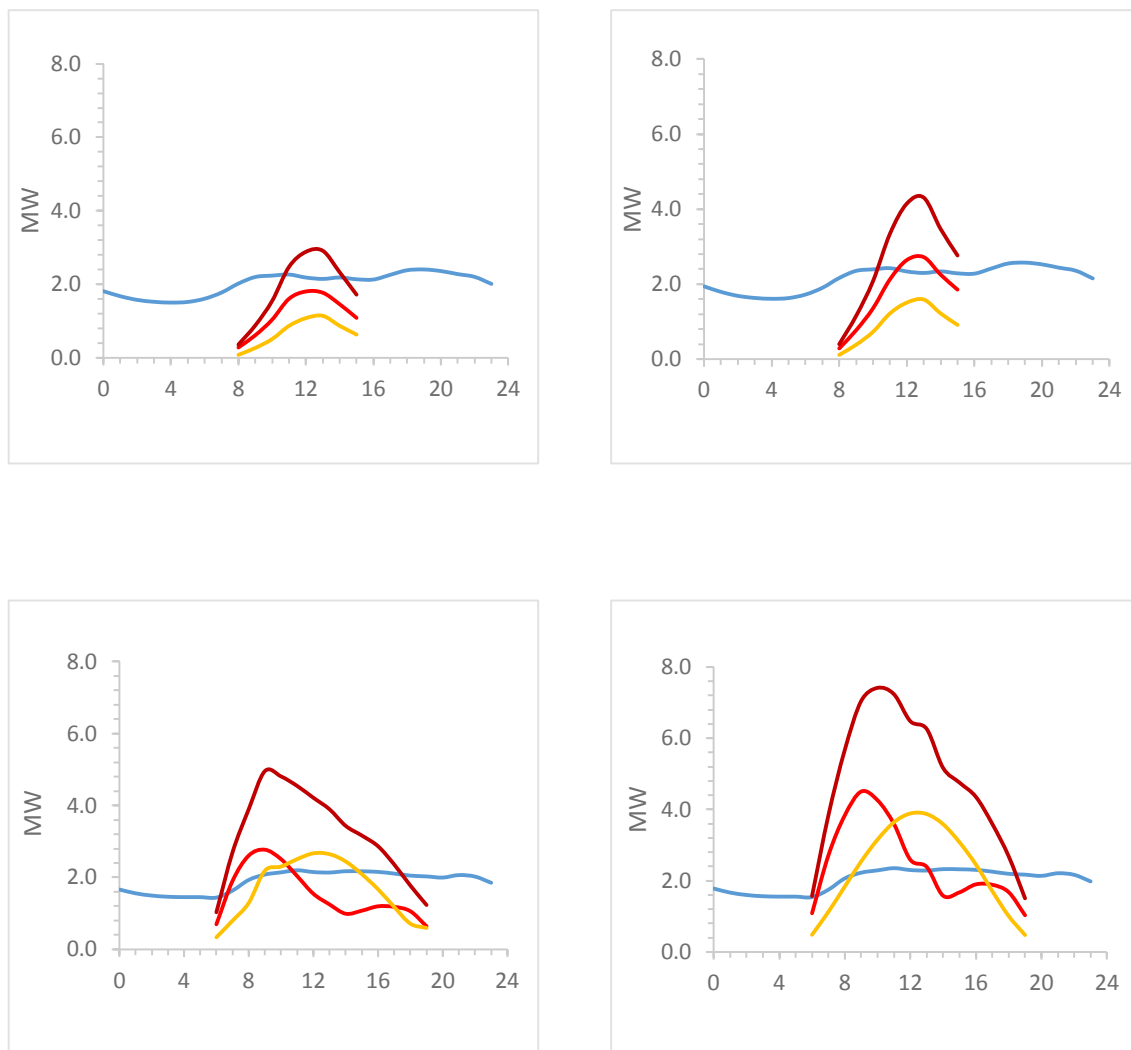


Figura 60 - Consumo horário de energia elétrica (linha azul) e potencial fotovoltaico de telhados (amarelo), fachadas (vermelho) e telhados e fachadas (vermelho escuro) para zona B (esquerda) e zona A (direita) para um dia de Inverno (em cima) e para um dia de Verão (em baixo).

Dadas as particularidades dos edifícios e os efeitos de sombreamento mútuo em ambas as zonas, as fachadas orientadas a oeste com um pico de produção no período da tarde têm um potencial muito inferior às fachadas orientadas a este. Nesta altura do ano, as fachadas não contribuem significativamente para o diagrama de produção, uma vez que o sol encontra-se no azimute apropriado, a sua altura favorece os telhados e não as fachadas. Se o potencial das ambas as superfícies fosse totalmente aproveitado, o consumo total durante as horas de sol seria várias vezes satisfeito pela produção fotovoltaica total, em dobro para a zona B e mais do triplicado para a zona A. O mais interessante é o facto de o pico de produção variar com a orientação, o que leva a uma proveitosa complementação entre telhados e fachadas, especialmente para as fachadas orientadas entre este e oeste.

Por estas razões, mesmo se restrições de ordem reguladora ou técnica quanto ao uso destes sistemas de energia nos telhados e/ou fachadas limitarem significativamente o potencial técnico das superfícies do edificado, pode concluir-se que durante as horas de sol nos meses de Verão, os sistemas de energia fotovoltaica poderiam satisfazer facilmente o consumo local total.

## 5 - Conclusões

Neste trabalho fez-se a avaliação da produção fotovoltaica em comparação com o consumo para duas zonas do município de Lisboa. O potencial foi avaliado para toda a área de fachadas e telhados dos edifícios de interesse das zonas de estudo, com interesse especial nos resultados da análise ao nível das fachadas, pelas razões descritas no capítulo 1. Os resultados anuais mostraram que as fachadas de ambas as zonas recebem anualmente, em proporção de área representativa, menos radiação do que as superfícies dos telhados e chão. Isto acontece mesmo na zona com edifícios mais altos e afastados e pode ser observando nas fachadas orientadas a este, portanto conclui-se de uma forma geral que os efeitos de sombreamento têm um efeito de segunda ordem no desempenho das fachadas. Ainda que a produção ao nível dos telhados se mostre suficiente para suprir as necessidades do consumo doméstico (sem *baseload*) na generalidade do ano, tal não acontece nos meses de Inverno para as duas zonas, situações em que a contribuição das melhores fachadas ( $> 900 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ ) é necessária. Em termos anuais, a contribuição total das fachadas é superior à contribuição total dos telhados para ambas as zonas. Os resultados apresentados permitem fazer duas considerações importantes do ponto de vista dos sistemas de energia no que toca à integração e gestão desta energia: Da perspetiva do consumo anual sem *baseload*, o potencial de telhados e/ou fachadas é suficiente para satisfazer as necessidades energéticas de ambas as zonas, mas continuam a ser necessárias soluções para consumo em *baseload*; Considerando o consumo sem *baseload* como consumo residencial, esse potencial pode ser considerado como fundamental para estabelecer agregados urbanos de edifícios *nearly zero energy*. A análise dos resultados para os dias típicos de Inverno e Verão apontam para a capacidade de produção *off-peak* das fachadas, com efeitos pouco ou nada significativos no Inverno mas bastante mais significativos no Verão. A complementaridade de produção entre fachadas e telhados sugere que durante as horas de sol, essa produção pode satisfazer totalmente as necessidades energéticas da zona, mesmo considerando os constrangimentos de ordem técnica e económica.

A metodologia utilizada nesta análise começou com a criação de um indicador de densidade do edificado (IDE), implementado por uma função de densidade do ArcGIS para caracterizar *a priori*

as zonas urbanas do município de Lisboa do ponto de vista da penetração de radiação solar. O indicador resulta do quociente entre a área construída (*Floor Area Ratio*) e a altura média dos edifícios, sendo portanto mais elevado para zonas onde se espera mais sombreamentos e menor para zonas mais favoráveis para o aproveitamento/produção de energia solar fotovoltaica em fachadas. Com base nos resultados seleccionaram-se duas zonas de interesse na cidade de Lisboa, uma com condições privilegiadas para o aproveitamento solar das fachadas, e outra que apresenta condições menos ideais. Mostrou-se que a qualidade da estimativa do indicador é sensível à qualidade dos dados utilizados. O processo de reclassificação das zonas de interesse, apontadas numa primeira fase pelo IDE, sugere que na implementação da função que origina a grelha de densidades, o raio de busca deve ser tal para que a pesquisa se mantenha dentro da subsecção pertencente.

A metodologia adaptada para a distribuição da população por edifício baseia-se na técnica de mapeamento dasimétrico que consiste em limitar a variável em questão às áreas em que realmente está presente, através da utilização de dados auxiliares que com esta estejam relacionados, no processo de interpolação zonal. Foram utilizados dados censitários, dados cartográficos em estrutura vetorial, imagens de satélite e fotografias do local no processo de classificação do edificado. Assumiu-se o volume total do edifício como fator proporcional ao número de indivíduos a distribuir, mesmo nos casos em que os edifícios não eram exclusivamente residenciais (casos em que os edifícios possam apresentar frações que não correspondem a habitações) para simplificar o processo de classificação, dado que a contabilização desse volume não residencial teria de ser feita caso a caso, e o número de edifícios de ambas as zonas das amostras é elevado. A aplicação e adaptação desta metodologia dependem bastante da informação disponível. A plataforma Lisboa Interativa e os dados censitários relativos ao número de edifícios foram extremamente importantes para alcançar maior rigor no processo de classificação, mas mesmo assim não são fontes de dados absolutamente concordantes, o que, aliado ao facto de os dados cartográficos utilizados não estarem atualizados, contribui para a diferença entre as estimativas e os números apontados pelo INE. A disponibilização de uma estrutura vetorial da cartografia dos edifícios que apresente uma classificação tipológica a mais detalhada possível é fundamental nestes processos, no entanto a construção deste tipo de informação é um processo certamente dispendioso, normalmente à responsabilidade das autarquias locais, e quando existe, a sua utilização é para propósitos oficiais. Não foi possível contabilizar o erro associado à distribuição da população uma vez que estes dados não existem, ou a informação não se encontra facilmente acessível (caso contrário não haveria necessidade de se aplicar esta metodologia para começar). No entanto, ao nível da subsecção o erro deveria ser nulo, tal só não acontece por questões de arredondamento no cálculo da distribuição: No caso da zona A foram distribuídos um total de 3750 indivíduos quando os dados censitários apontam para 3742, e no caso da zona B

foram distribuídos um total de 3306 indivíduos quando os dados censitários apontam um total de 3313, e assim sendo, na estimativa do consumo de energia elétrica foram utilizados os números apontados pelos dados censitários. O consumo médio *per capita*, estimado a partir dos níveis de consumo sem *baseload* ao longo do ano é 1,128 MWh/pessoa/ano, que está próximo do consumo apontado pela base de dados PORDATA (PORATA, 2013) para o município de Lisboa em 2013 (1,3 MWh/pessoa/ano).

O potencial solar foi modelado com recurso ao programa SOL. É importante referir que os resultados deste algoritmo ainda não foram validados e como tal não é possível estimar com rigor o erro associado aos cálculos da radiação. Condicionado pela grelha LiDAR DSM de entrada, o algoritmo assume várias simplificações. Considera apenas três categorias de elementos urbanos distintas: solo, árvores e edifícios, não considerando a radiação refletida pelo solo e árvores na contabilização da radiação que atinge as superfícies dos edifícios. As superfícies de interesse (telhados e fachadas) consideram-se planas e homogêneas (Não são consideradas as janelas nem as varandas ou outros elementos que podem estar presentes como ventiladores de sistemas de climatização), isto porque a informação detalhada das fachadas não fica bem definida no varrimento feito pelo sensor *LiDAR*, dada a sua própria geometria, no entanto, considera-se que essa assunção não reduz significativamente o teor das conclusões tiradas quanto ao potencial solar, dada a escala das áreas de estudo e a resolução de um metro de cada *pixel* da grelha *LiDAR* de entrada. As superfícies que estão longe de serem verticais são consideradas como telhados inclinados quando a inclinação é dirigida para fora, e como fachadas perfeitamente verticais, em casos raros, que a inclinação seja dirigida para dentro. Estas generalizações podem ser reduzidas com a disponibilização de um modelo urbano tridimensional num formato mais fácil de processar. No cálculo da radiação difusa, não considera o ângulo de incidência das contribuições de cada segmento de céu. Essa consideração poderia refinar esse cálculo.

Todas as limitações e problemas encontrados na criação e aplicação desta metodologia podem ser ultrapassados em trabalho futuro. A pesquisa de revisão bibliográfica deu a conhecer vários estudos que abordam desenvolvimentos fundamentais em várias etapas do processo no sentido de atingir maior precisão, nomeadamente ao nível da aquisição de informação e ao nível do cálculo executado pelos modelos de potencial solar. Melhorar a qualidade da produção de cartografia de base, devidamente estruturada e atualizada (a paisagem urbana é dinâmica e os elementos que a compõe sofrem transformações) passa seguramente pela aposta nos desenvolvimentos da tecnologia LiDAR mais recente como é o caso da já referida tecnologia *fullwaveform* que permite maior capacidade de registo, bem como nos processos de interpretação e classificação desta informação (Mallet & Bretar 2009) . A cartografia pode assim incluir detalhes específicos que melhorem a análise e representação do recurso solar em ambiente urbano, como por exemplo as propriedades físicas (refletividade) e geométricas (inclinação, orientação) das superfícies de

interesse dos edifícios. Outra limitação importante encontrada neste estudo diz respeito à identificação das fachadas. Como já foi referido as fachadas foram construídas por hiper-pontos tendo em conta a cota de base e de topo de cada edifício que por sua vez foram associados à cartografia do edificado de interesse com base numa operação de análise de proximidade e como tal a fachada é descrita por pontos que não incluem informação quanto ao aspeto da fachada, assumindo portanto a homogeneidade da superfície. A fusão da informação resultante do processamento para pontos de telhados e fachadas com um modelo tridimensional das áreas de estudo como foi explorado por Catita et al. 2014 refina o estudo ao nível individual do edifício ou fachada, ao ponto de permitir uma melhor identificação das janelas e varandas e esta distinção é importante, por exemplo, para responder de forma mais precisa a questões como qual a área útil para a instalação de sistemas fotovoltaicos nestas superfícies. A precisão da metodologia aplicada à estimativa do consumo de energia elétrica depende bastante da cartografia utilizada e dos atributos estatísticos associados, e pode ser melhorada com a utilização de cartografia mais completa deste ponto de vista. A utilização de mais informação auxiliar na técnica de mapeamento dasimétrico, que seja representativa de outros fatores que influenciam a distribuição da população no meio urbano pode ser explorada e permitir a estimativa de diferentes perfis de consumo. Futuramente, é também importante validar os resultados do programa SOL para perceber qual o grau de incerteza associado ao cálculo do potencial solar. Além disso seria interessante discutir a escalabilidade desta metodologia a uma área de estudo mais abrangente no município. Como ponto de partida para esta discussão é relevante discutir a representatividade das amostras escolhidas. A altura média dos edifícios presentes na cartografia mais abrangente é cerca de 10 metros, portanto edifícios que têm em média entre 3 e 4 andares. A altura média dos edifícios presentes na cartografia das duas áreas de estudo é de cerca de 13 metros, portanto edifícios que têm em média entre 4 e 5 andares. Tratam-se em ambos os casos de edifícios com mais de um proprietário ou arrendatário, portanto edifícios de apartamentos. Segundo os dados do INE (INE,2011) este é o tipo de propriedade mais comum no município e portanto é expectável que a tipologia das amostras se repita pela cidade como um todo.

O desenvolvimento deste trabalho criou a convicção de que os resultados dos modelos de potencial solar associados a ferramentas de representação espacial como os SIG constituem ferramentas muito importantes para responder de forma mais elucidativa a questões como quais os melhores locais para a implementação de sistemas de conversão de energia solar e facilitar processos de decisão por parte de especialistas em planeamento urbano, técnicos de instalação e publico em geral, podendo mesmo relançar as políticas de incentivo ao aproveitamento da energia solar em ambiente urbano e de forma descentralizada.

## 6. Referências

- Aguiar, R., 1998. Dados Meteorológicos para Energias Renováveis e URE em Portugal (PCLIMA project). Final report ALTENER XVII/4.1030/Z/98-92), INETI – DER, Lisbon.
- Brito, M.C. et al., 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86(1), pp.283–288. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11003574> [Accessed March 20, 2014].
- Carneiro, C., 2011. Extraction of Urban Environmental Quality Indicators using LIDAR-Based Digital Surface Models. , 5050. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Extraction+of+Urban+Environmental+Quality+Indicators+using+LiDAR-Based+Digital+Surface+Models#0> [Accessed August 4, 2014].
- Catita, C. et al., 2014. Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Computers & Geosciences*, 66, pp.1–12. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300414000053> [Accessed March 20, 2014].
- Erdélyi, R. et al., 2014. Three-dimensional SOLar RAdiation Model (SORAM) and its application to 3-D urban planning. *Solar Energy*, 101, pp.63–73. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X13005483> [Accessed March 20, 2014].
- Freire, S. & Gomes, N., 2010. Aplicação de mapeamento dasimétrico inteligente na modelação da distribuição espaço-temporal da população na Área Metropolitana de Lisboa . , 2(2009).
- Hofierka, J. & Zlocha, M., 2012. A New 3-D Solar Radiation Model for 3-D City Models. , 16(5), pp.681–690.
- INE (Instituto Nacional de Estatística). (2011). Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal. Retrieved from <http://www.ine.pt/>.
- Izquierdo, S., Rodrigues, M. & Fueyo, N., 2008. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, 82(10), pp.929–939. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X08000625> [Accessed May 21, 2014].



- Jakubiec, J.A. & Reinhart, C.F., 2013. A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. *Solar Energy*, 93, pp.127–143. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X13001291> [Accessed April 28, 2014].
- Jelle, B.P. & Breivik, C., 2012. State-of-the-art Building Integrated Photovoltaics. *Energy Procedia*, 20(1876), pp.68–77. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212007394> [Accessed March 20, 2014].
- Kumar, L., Skidmore, A.K. & Knowles, E., 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), pp.475–497. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/136588197242266> [Accessed March 20, 2014].
- Lwin, K.K. & Murayama, Y., 2007. Interactive Online Micro-spatial Population Analysis Based on GIS Estimated Building Population. , pp.1–14.
- Mallet, C. & Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), pp.1–16. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271608000993> [Accessed May 6, 2014].
- Perez, R., Seals, R. & Michalsky, J., 1993. ERRATUM T o All-Weather Model for Sky Luminance Distribution--Preliminary Configuration and Validation by. , 5(5), p.1993.
- PORDATA (Base de Dados Portugal Contemporâneo). (2013). Consumo de energia elétrica. Retirado de <http://www.pordata.pt/>.
- Ratti, C. & Richens, P., 2004. Raster analysis of urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), pp.297–309. Available at: <http://www.envplan.com/abstract.cgi?id=b2665> [Accessed May 2, 2014].
- Redweik, P., Catita, C. & Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, pp.332–341. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X13003460> [Accessed March 19, 2014].

- REN (Rede Elétrica Nacional). (2011). Consumo de energia elétrica. Retirado de <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/>.
- Santos, T. et al., 2014. Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51, pp.48–57. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143622814000587> [Accessed May 1, 2014].
- Šúri, M. et al., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10), pp.1295–1305. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X07000229> [Accessed August 5, 2014].
- Tooke, T.R. et al., 2012. Integrated irradiance modelling in the urban environment based on remotely sensed data. *Solar Energy*, 86(10), pp.2923–2934. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X12002381> [Accessed May 21, 2014].
- Ural, S., Hussain, E. & Shan, J., 2011. Building population mapping with aerial imagery and GIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6), pp.841–852. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243411000870> [Accessed March 20, 2014].
- Vats, K. & Tiwari, G.N., 2012. Performance evaluation of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal system for roof and façade. *Energy and Buildings*, 45, pp.211–218. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811005482> [Accessed May 20, 2014].